FAKULTATYVINIS FIZIKOS KURSAS

MOKYMO PRIEMONĖ
X KLASEI

Originalą redagavo
A. PIORYŠKINAS, S. KAMENECKIS

KAUNAS ● ŠVIESA ● 1980

53(075)
Fa 204

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ
IX класс. Пособие для учащихся
Авторы: *С. В. Анофрикова, М. А. Бобкова, Л. А. Иванова, С. Е. Каменецкий, Т. И. Носова, Н. С. Пурышева, Н. Е. Парфентьева, М. М. Терентьев*
Москва, «Просвещение», 1976

Vertė ALGIRDAS PETRAITIS

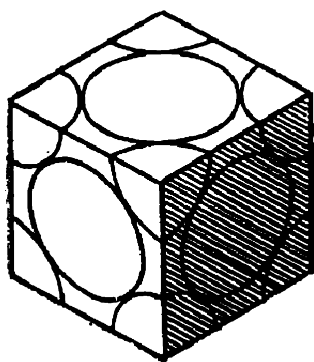
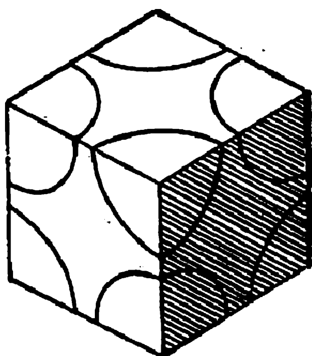
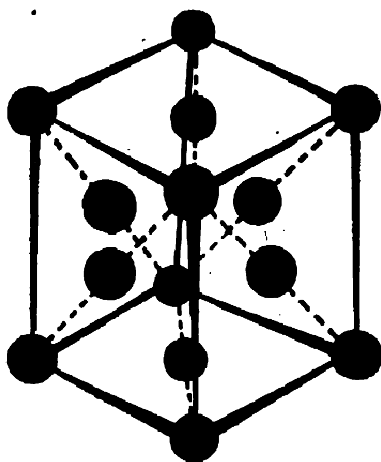
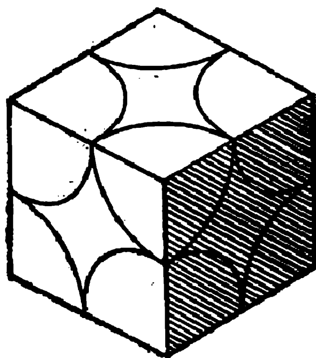
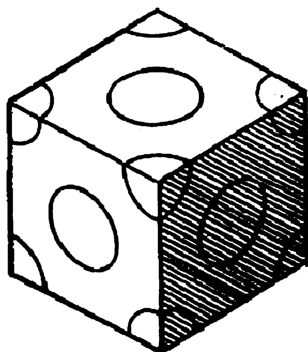
Lietuvos TSR švietimo ministerijos rekomenduota

Fa 204 **Fakultatyvinis** fizikos kursas. Mokymo priemonė X klasei. K.: „Šviesa", 1980.— 155 p., iliustr.

Paskutiniame puslapyje aut.: S. Anofrikova, M. Bobkova, L. Ivanova, S. Kameneckis, T. Nosova, N. Puryševa, N. Parfentjeva, M. Terentjevas.
Knygoje išdėstyta X klasės fakultatyvinio fizikos kurso teorinė medžiaga, apimanti du skyrius: „Molekulinę fiziką" ir „Elektrodinamiką", pateikta uždavinių sprendimo pavyzdžių, užduotys savarankiškam darbui ir rekomendacijos, kaip atlikti praktikumo darbus.

F $\frac{60601-532}{M\,853(10)-80}$ 144—80 53(075)

TURINYS

ĮVADAS

Kietųjų kūnų sandarą ir savybes tyrinėja įvairūs mokslai: fizika, kristalografija[1], chemija. Kad aiškiau įsivaizduotume kietųjų kūnų sandarą ir savybes, reikia taikyti visų šių mokslų tyrimų rezultatus. Šioje knygoje pagrindinis dėmesys skiriamas fizikai, jos metodams, nagrinėjant šį klausimą.

Kietojo kūno fizika — mokslas apie kietųjų kūnų sandarą ir savybes bei vykstančius juose reiškinius. Dabar tai svarbiausia visų fizikos tyrimų sritis. Šioje srityje dirba beveik pusė visų pasaulio fizikų, pusė visų kasmet spausdinamų fizikos darbų yra skiriama kietųjų kūnų fizikos problemoms.

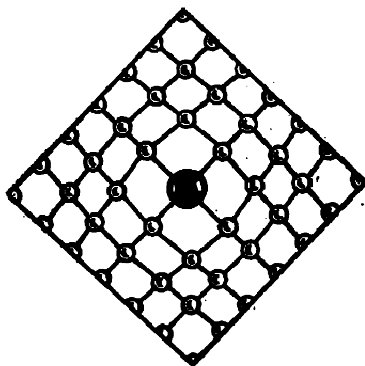
Kietojo kūno fizika taip labai domimasi ne vien todėl, kad ji yra patraukli. Svarbiausia, jog kietojo kūno fizika šiandien remiasi visa šiuolaikinė technika. Visos statybinės ir konstrukcinės medžiagos (įvairių markių plienas, visi galimi metalų lydiniai, medis, polimerai, gelžbetonis, plytos ir t. t.) — tai kietosios medžiagos. Bet kurioje technikos srityje taikomos vienos arba kitos kietųjų kūnų savybės: elektrinės, optinės, mechaninės, šiluminės, antikorozinės ir t. t. Kietojo kūno fizika tiria ir išaiškina jų savybes, kad mokėtume numatyti, kas atsitiks su kietuoju kū-

---

[1] Kristalografija — mokslas apie kristalus ir jų savybes.

nu įvairiomis jų eksploatacijos sąlygomis. Be to, kietojo kūno fizika turi nurodyti, kaip gauti naują medžiagą, turinčią reikiamas savybes, kokia turi būti jos struktūra, cheminė sudėtis ir t. t.

Vis labiau technikoje taikomi *monokristalai,* jų elektrinės ir optinės savybės. Kuriant šiuolaikinius optinius kvantinius generatorius — lazerius, buvo remiamasi kai kurių monokristalų (rubino ir kt.) savybėmis.



KIETŲJŲ KŪNŲ ŠILUMINĖS IR MECHANINĖS SAVYBĖS

I SKYRIUS

KRISTALŲ SIMETRIJA

I. KAIP KRISTALAI AUGA

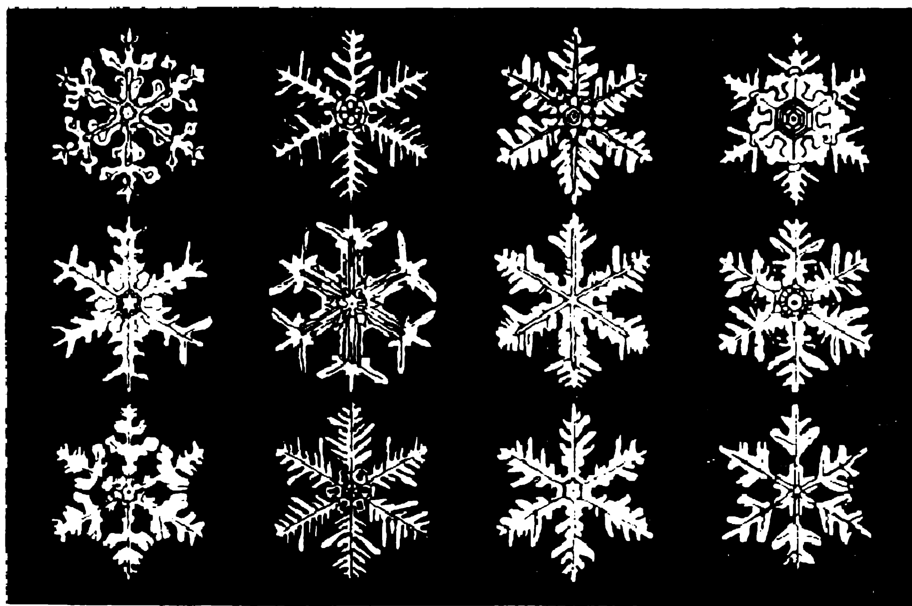
Iš mokyklinio fizikos kurso žinome, kad kietieji kūnai gali būti dviejų būsenų — amorfiniai ir kristaliniai. Šiame fakultatyviniame kurse nagrinėsime tik kristalinių kūnų sandarą ir savybes.

Dauguma aplink mus esančių kietųjų kūnų yra *polikristalai:* jie sudaryti iš daugybės atskirų netvarkingai vienas kito atžvilgiu orientuotų kristalėlių. Plieno arba ketaus kristalų orientaciją ir išdėstymą galima pamatyti pro mikroskopą.

Uolienos gabale dažnai randami atskiri kristalai — kokios nors medžiagos, pavyzdžiui, kvarco, turmalino ar kitų, monokristalai. Visada šie kristalai būna maži, įsiterpę į uolieną ir iš dalies pasislėpę. Atskiri stambūs taisyklingos formos kristalai gamtoje randami labai retai. Tačiau tokius kristalus galima išauginti dirbtinėmis sąlygomis.

Kristalizacija gali vykti tirpale, lydinyje, taip pat dujinės būsenos medžiagoje.

Kai temperatūra ir slėgis pastovūs, vieno ar kito skysčio duotame tūryje galima ištirpinti tik tam tikrą kiekį vienos ar kitos kristalinės medžiagos. Taip gautas tirpalas vadinamas *prisotintuoju.* Į prisotintą tirpalą įleistas kristalas neaugs ir netirps. Pašildžius tirpalą, daugiau ištirpsta medžiagos, todėl tas tirpinamos medžiagos kiekis tirpalo neprisotina. Kristalai, patekę į neprisotintą tirpalą, pradeda tirpti. Atšaldytas prisotintas tirpalas tampa *persotintu.* Persotintas tirpalas uždarame inde nesikristalizuoda-



1 pav.

mas gali išsilaikyti gana ilgai. Tačiau į persotintą tirpalą patekus mažiausiai kristalo dalelei, tirpalas tuojau ima kristalizuotis.

Taigi persotintas tirpalas yra būtina, tačiau nepakankama sąlyga kristalizacijai. Kad prasidėtų kristalizacija, į tirpalą reikia įdėti jos užuomazgą — mažytį ištirpintos medžiagos kristalą.

Kristalai tirpaluose auginami taip. Iš pradžių skystyje (vandenyje) ištirpinamas reikiamas kristalinės medžiagos kiekis. Tirpalas kaitinamas tol, kol visa kristalinė medžiaga ištirpsta. Vėliau tirpalas lėtai aušinamas ir taip paverčiamas persotintu. Persotintame tirpale pakabinama kristalizacijos užuomazga.

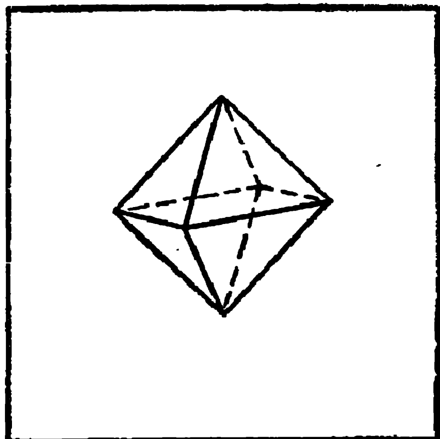
Jei kristalizacijos laikotarpiu visame tirpalo tūryje bus pastovi temperatūra ir tankis, kristalas augs taisyklingos formos.

Tirpale gaunamo kristalo forma priklauso nuo daugelio veiksnių: konvekcinių skysčio srovių, skysčio persotinimo laipsnio, priemaišų ir t. t.

Tirpalo peršaldymo laipsnis (o dėl to ir kristalizacijos greitis) labai pakeičia kristalo formą. Labai peršaldytuose skysčiuose visada susidaro ilgų, adatos pavidalo keistai susijungusių kristalų. Pavyzdys — ledo ornamentai languose. Snaigių formos taip pat patvirtina, kad peršaldytame ore vandens garai greičiau kristalizuojasi spindulių kryptimis. Krintančios snaigės atskiros molekulės gali išgaruoti (jei snaigės patenka į oro sluoksnius, kur mažesnis garų tankis arba aukštesnė temperatūra). Tai ir nulemia skirtingą ir nepakartojamą snieguolių formą (1 pav.).

1 užduotis. Užauginkite pakankamai didelį aliuminio-kalio alūnų kristalą. Tam išfiltruokite 15% karštą alūnų tirpalą ir supilkite į plokščią indą. Auštant ant indo dugno nusės alūnų kristaliukai. Palikite ant dugno 3—4 didesnius kristaliukus. Kad jie taisyklingai augtų, kas 4—6 valandos kristaliukus apverskite ant mažesnės sienos. Per dvi dienas jie išaugs iki 1 cm dydžio. Paaiškinkite, kodėl rekomenduojama apverčiamą alūnų kristalą padėti ant mažesnės sienos.

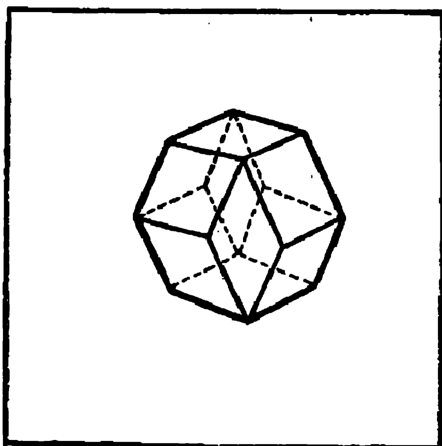
Literatūra. Путилов К. А. Курс физики. Изд. 2-ое. Т. 1. М., Физматгиз, 1960, р. 500—501.



2 pav.

2. IDEALI KRISTALŲ FORMA

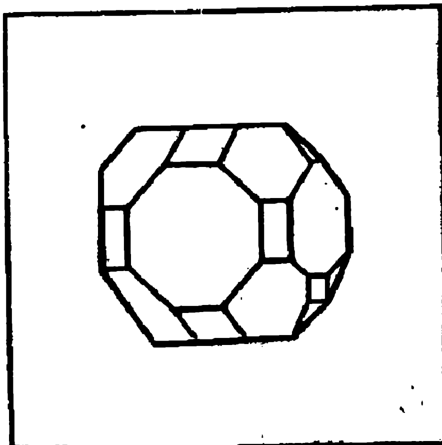
Forma, kurią įgyja augdamas monokristalas, pašalinus visus atsitiktinius veiksnius, vadinama idealia. Ideali kristalo forma yra briaunainis. Toks kristalas yra simetriškas, jo sienos — plokščios, briaunos — tiesios. Kaip ir visi briaunainiai, kristalas turi tam tikrą skaičių sienų p, briaunų r ir viršūnių e, ir šiuos skaičius sieja ryšys $p+e=r+2$. Pavyzdžiui, kubas turi 6 sienas, 8 viršūnes ir 12 briaunų $(6+8=12+2)$. Patikrinkite, ar tinka šis ryšys oktaedrui (2 pav.), dodekaedrui[1] (3 pav.).



3 pav.

Kubas, oktaedras, dodekaedras yra paprasti taisyklingi briaunainiai. Taisyklingų briaunainių formą kristalizuodamiesi įgyja palyginti nedaugelis kristalų. Kubo formos esti valgomosios druskos, cinko sulfido kristalai, oktaedro formos yra deimantas, rombinio dodekaedro formos — granatas.

Dažniausiai medžiaga kristalizuojasi sudėtingų briaunainių



4 pav.

[1] Oktaedras — aštuoniasienis, dodekaedras — dvylikasienis.

pavidalo kristalais, t. y. kristalai turi lygias kelių rūšių sienas. Pavyzdžiui, alūnų kristalas (4 pav.) turi 6 aštuoniakampes sienas, 8 šešiakampes sienas ir 12 keturkampių sienų.

3. KAMPŲ PASTOVUMO DĖSNIS — PAGRINDINIS KRISTALOGRAFIJOS DĖSNIS

Tos pačios medžiagos kristalai gali būti visiškai skirtingos formos. Jau minėjome, kad kristalų forma priklauso nuo kristalizacijos sąlygų. Kristalų spalva irgi nėra būdingas kristalų požymis, nes ji ypač priklauso nuo priemaišų. Pavyzdžiui, fluorito kristalai gali būti bespalviai, rausvi, juodi, violetiniai, tamsiai raudoni ir gelsvi. Atrodytų, kad, tik ištyrus kristalų cheminę sudėtį, galima sužinoti, ar du kristalai (skirtingos formos ir spalvos) yra tos pačios medžiagos. Tačiau kristalografai atrado iš pirmo žvilgsnio neįtikėtiną dėsnį: **tos pačios medžiagos kristalų kampai tarp atitinkamų sienų visada vienodi (kampų pastovumo dėsnis).**

Kokios sienos vadinamos atitinkamomis?

Geometrijoje sienos (plokštieji daugiakampiai) laikomos lygiomis[1], jeigu, jas uždėjus viena ant kitos, visi atitinkami taškai sutampa. Kristalografijoje sienų tapatybė apibūdinama visai kitaip. Gali skirtis sienų forma, tačiau jeigu jos turės vienodas fizines ir chemines savybes, vis tiek bus laikomos lygiomis. Apžiūrėjus sienas, kartais pavyksta sužinoti, ar jos kristalografijos požiūriu yra lygios. Jeigu kyla abejonių, kristalo paviršius veikiamas rūgštimi. Lygiose sienose rūgštis išėda vienodą piešinį.

5 paveiksle vienodai subrūkšniuotos vienodos (lygios) sienos. Kvarco kristale aptinkamos trijų rūšių sienos (6 paveiksle jos pažymėtos *a*, *b* ir *c*). Nors nevienodų kvarco kristalų sienos *a* (*b*, *c*) yra skirtingo dydžio ir formos, jos laikomos lygiomis.

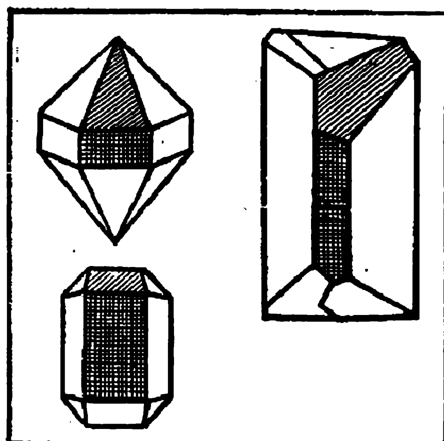
Kampų pastovumo dėsnis teigia, kad tos pačios medžiagos skirtingų kristalų sienų *a* ir *b* dvisieniai kampai (6 pav.) vienodi. Atitinkamai tos medžiagos visuose kristaluose dvisieniai kampai, kuriuos sudaro sienos *a* ir *c*, *b* ir *c*, yra lygūs.

Taigi ne kristalo forma, ne sienų dydžiai, o kampas tarp jų apibūdina kiekvieną kristalą. Išmatavus nežinomo kristalo dvisienius kampus, pagal specialų katalogą galima nustatyti jo cheminę sudėtį.

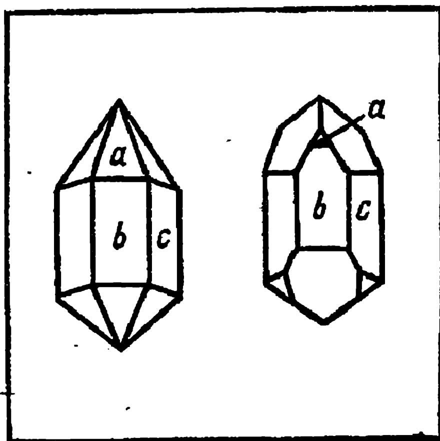
2 užduotis. Paruoškite pranešimą tema „Kaip matuojami kristalų kampai“.

Literatūra. Шаскольская М. П. Кристаллы. М., Гостехиздат, 1956.

[1] Dabartiniuose mokykliniuose vadovėliuose tokios figūros vadinamos kongruenčiomis.



5 pav.



6 pav.

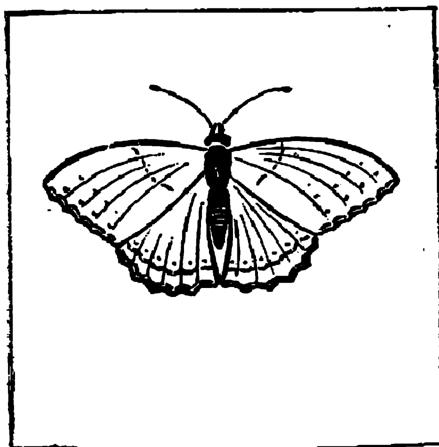
4. APIE SIMETRIJĄ

Gamtoje yra daug simetriškų daiktų. Simetriškas yra drugelis (7 pav.). Kairiojo sparno forma, piešinys ir spalva pakartoja dešiniojo sparno formą, piešinį ir spalvą. Dešinė žmogaus ranka simetriška kairiajai, jas sudėjus, kontūrai sutampa. Simetriškos yra svirtinės svarstyklės. Kiekvienas daiktas simetriškas savo veidrodiniam atvaizdui.

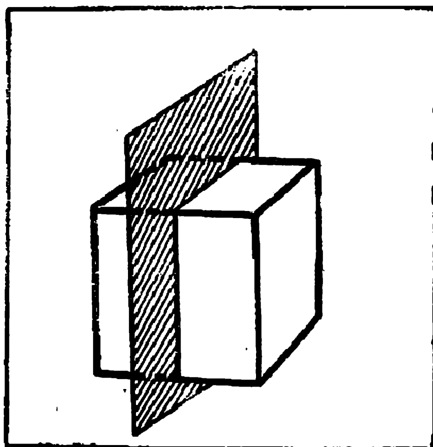
Jeigu kūną mintyse galima perkirsti plokštuma taip, kad kiekvienas jo taškas *a* vienoje plokštumos pusėje atitiktų tašką *b* kitoje plokštumos pusėje ir kad tiesė *ab*, jungianti tuos taškus, būtų statmena kertančiajai plokštumai, o plokštuma dalytų tiesę pusiau, tai toks kūnas pasižymi *veidrodine simetrija*, o tokia plokštuma vadinama *simetrijos plokštuma.* Pavyzdžiui, plokštuma, išvesta per kubo briaunų vidurį ir lygiagreti dviem sienoms, yra kubo simetrijos plokštuma (8 pav.). Kubas turi devynias simetrijos plokštumas.

Be veidrodinės simetrijos, kūnas dar gali turėti *posūkio simetriją.* Kūnas pasižymi posūkio simetrija, jeigu pasukto tam tikru kampu kūno ir nepasukto kūno visos dalys sutampa. Ašis, apie kurią sukasi kūnas, vadinama *simetrijos ašimi.* Pagal tai, kiek kartų, pilnai apsisukdamas apie ašį, kūnas sutampa pats su savimi, simetrijos ašis turi skirtingą eilę (pirmos, antros, trečios eilės ir t. t.). Pavyzdžiui, vilkdalgio žiedo simetrijos ašis yra trečios eilės (9 pav.), o snaigės (1 pav.) — šeštos eilės. Gėlių simetrijos ašis dažnai yra penktos eilės (10 pav.).

Kūnas dar gali turėti *simetrijos centrą.* Simetrijos centras — taškas kūno viduryje, kurio atžvilgiu kiekvieną kūno tašką atitinka kitas taškas, nutolęs tokiu pačiu atstumu nuo centro priešinga kryptimi.



7 pav.

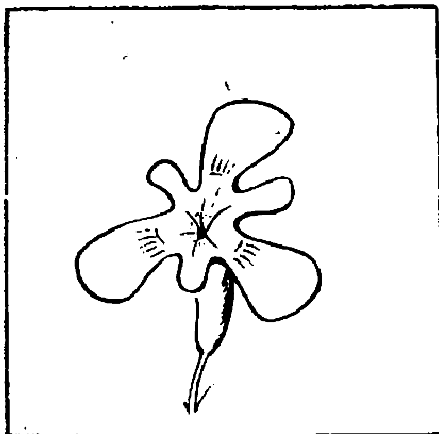


8 pav.

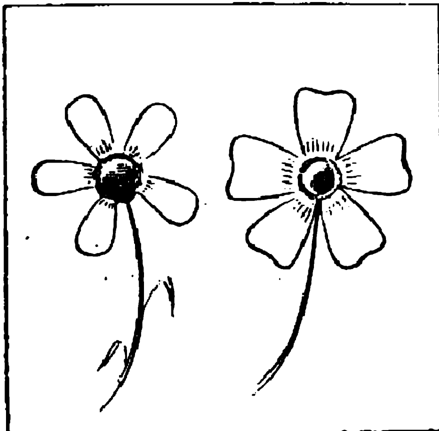
Kūnas gali turėti keletą simetrijos plokštumų, keletą skirtingos eilės simetrijos ašių, tačiau negali turėti daugiau kaip vieną simetrijos centrą.

Jei 11 paveiksle pavaizduoto lygiagretainio kampus atlenksime į priešingas puses, šios figūros viduryje gauto kvadrato centras bus simetrijos centras, nes jis dalija pusiau visas tieses, jungiančias vienodų figūros taškų poras (tuo įsitikinkite, atlikdami bandymą). Rutulio, kubo, oktaedro geometrinis centras yra šių kūnų simetrijos centras.

Simetrijos ašis, plokštuma ir centras vadinami *simetrijos elementais*. Simetrijos elementai pasižymi šiomis savybėmis.



9 pav.



10 pav.

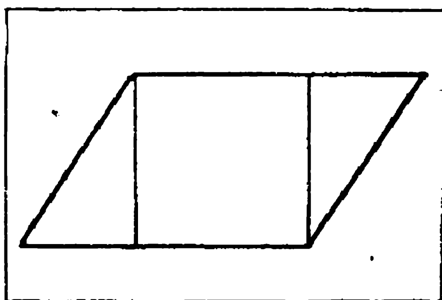
1. Susikirsdamos tarpusavy dvi simetrijos plokštumos sudaro simetrijos ašį.

2. Susikirsdamos tarpusavy trys viena kitai statmenos simetrijos plokštumos sudaro simetrijos centrą.

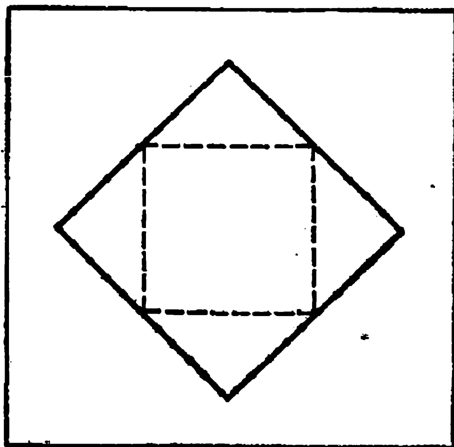
3 užduotis. Išpjaukite iš kieto popieriaus 11 ir 12 paveiksle pavaizduotas figūras. Atlenkite į vieną pusę tų figūrų kampus 90° ir nustatykite, kokius jos turi simetrijos elementus.

4 užduotis. Paruoškite pranešimą tema „Simetrija gamtoje“.

Literatūra. Вейль Г. Симметрия. М., «Наука», 1968.
Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Л., «Недра», 1968.



11 pav.



12 pav.

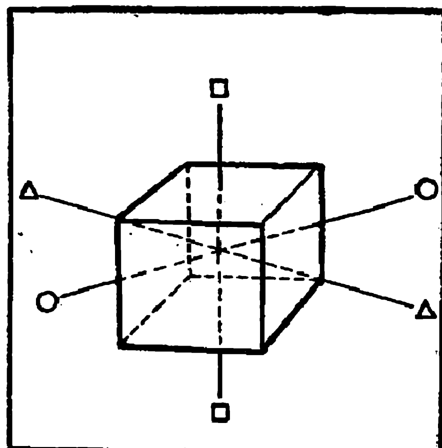
5. KRISTALŲ SIMETRIJA

Idealios kristalų formos yra simetrinės. Anot žymaus rusų kristalografo E. Fiodorovo (1853—1919), „kristalai spindi simetrija“.

Kristalai gali turėti įvairių simetrijos elementų: simetrijos plokštumą, simetrijos ašį, simetrijos centrą.

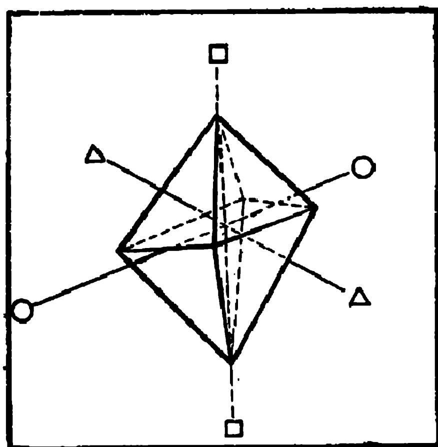
Panagrinėsime kai kurių paprasčiausių formų kristalų simetrijas.

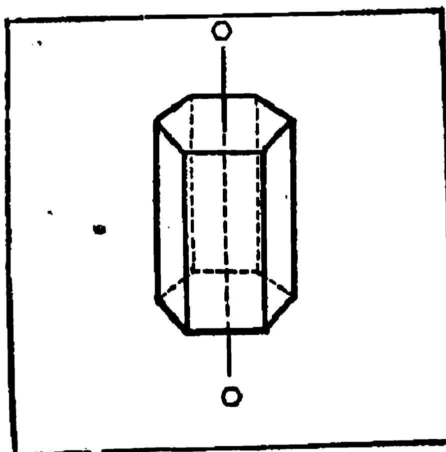
Kubo formos kristalai (NaCl, KCl ir kt.) turi devynias simetrijos plokštumas, iš kurių trys eina lygiagrečiai kubo sienoms, o šešios — įstrižainėmis. Be to, kubas turi šias simetrijos ašis: tris — ketvirtos eilės, keturias — trečios eilės ir šešias — antros eilės[1] (13 pav.). Jis dar

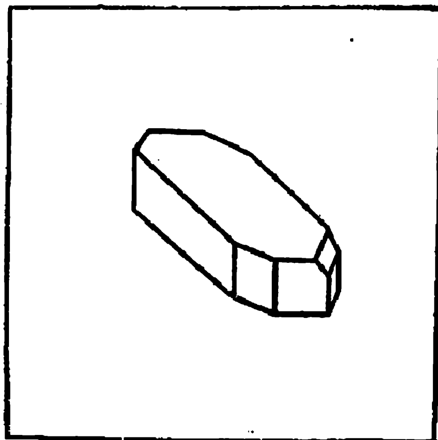


13 pav.

[1] Paveiksle ženklu □ pažymėta viena ketvirtos eilės simetrijos ašis, △ — viena trečios eilės simetrijos ašis, ○ — viena antros eilės ašis.


14 pav.


15 pav.


16 pav.

turi simetrijos centrą. Iš viso kube yra 1+9+3+4+6=23 simetrijos elementai.

Deimanto, kalio alūnų kristalai yra oktaedrų formos. Oktaedrai, kaip ir kubai, turi tokius pat simetrijos elementus. 14 paveiksle parodytos oktaedro sukimosi ašys.

Magnio kristalai yra heksogonalinės prizmės (t. y. prizmės, besiremiančios į taisyklingą šešiakampį) formos. Jie turi 6 simetrijos plokštumas ir vieną šeštos eilės simetrijos ašį (15 pav.). Vario sulfato kristalai (16 pav.) turi tik simetrijos centrą, kitų simetrijos elementų jie neturi.

Iš šios trumpos įvairių kristalų simetrijų apžvalgos galime daryti išvadą, kad **skirtingi kristalai turi skirtingas simetrijas.** Vienos formos turi daug simetrijų (kubas, oktaedras), o kitos — mažai (vario sulfato kristalai). Skirtingi kristalai turi kitokius simetrijos elementus. Pavyzdžiui, magnio kristalai turi šeštos eilės simetrijos ašį, o NaCl kristalai — 13 simetrijos ašių, tačiau nė viena jų nėra šeštos eilės simetrijos ašis ir t. t.

Simetrijos elementų visuma apibūdina *simetrijos rūšį.* Todėl galima tvirtinti, kad valgomosios druskos (kubo formos) ir kalio alūnų (oktaedro formos) kristalai turi vienodą simetriją ir yra tos pačios simetrijos rūšies.

Magnio, vario sulfato kristalai turi savitas simetrijos rūšis.

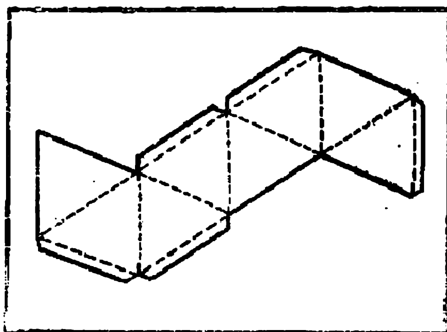
Iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad simetrijos klasių gali būti be galo daug. Geometrinės figūros (briaunainiai) tikrai turi

labai daug simetrijos rūšių. Tačiau kristalams nebūdinga penktos eilės sukimosi ašis ir aukštesnės kaip šeštos eilės sukimosi ašys. Tai apriboja kristalų galimų simetrijos rūšių kiekį. 1867 m. rusų inžinierius ir kristalografas A. Gadolinas pirmasis akivaizdžiai įrodė, kad kristalai gali turėti tik 32 simetrijos klases.

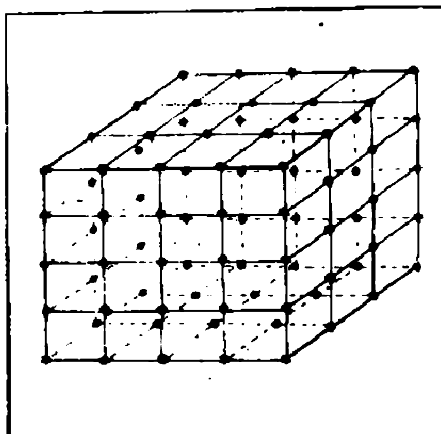
5 užduotis. **Pagal 17 paveiksle pateiktą iškarpą iš popieriaus suklijuokite oktaedrą ir nustatykite tos figūros šiuos simetrijos elementus: 9 simetrijos plokštumas, tris ketvirtos eilės, keturias trečios eilės, šešias antros eilės simetrijos ašis ir simetrijos centrą.**

6 užduotis. **Įrodykite, kad kristalai negali turėti penktos eilės ir aukštesnės kaip šeštos eilės simetrijos ašių.**

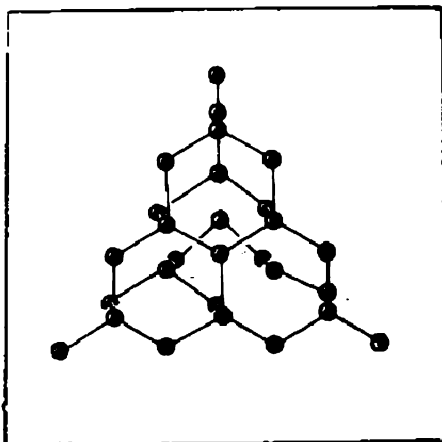
Literatūra. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7. М., «Мир», 1966, p. 15.



17 pav.



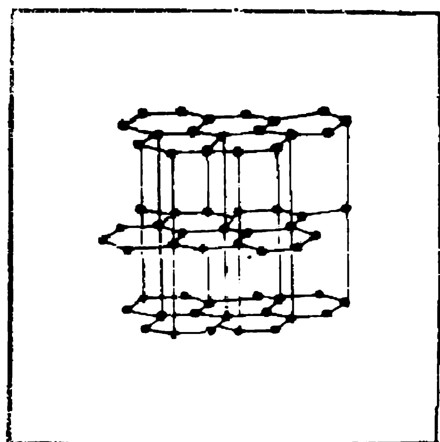
18 pav.



19 pav.

6. ERDVINĖ GARDELĖ

Simetrija, kampų pastovumo dėsnis ir daugelis kitų kristalų savybių paskatino kristalografus spėlioti, kad kristalus sudarančios dalelės yra išsidėsčiusios dėsningai. Jie teigė, kad kristaluose dalelės išsidėsčiusios taip, jog jų sunkio centrai sudaro taisyklingą *erdvinę gardelę*. Pavyzdžiui, valgomosios druskos NaCl kristalus sudaro daugybė Na^+ ir Cl^- jonų, išsidėsčiusių vienas kito atžvilgiu tam tikru būdu. Kiekvieną joną pažymėjus tašku ir juos tarpusavy sujungus, galima gauti geometrinę figūrą, vaizduojančią valgomosios druskos idealaus kristalo vidinę struktūrą, jo erdvinę gardelę (18 pav.).



20 pav.

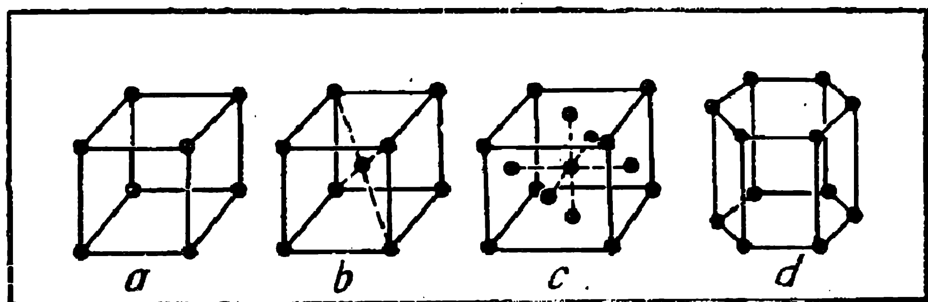
Skirtingų kristalų skirtingos ir erdvinės gardelės. 19 paveiksle parodyta deimanto erdvinė gardelė, o 20 paveiksle — grafito.

Kiekvienoje erdvinėje gardelėje galima išskirti keletą jos struktūros pasikartojančių elementų, arba, kitaip sakant, *elementarų narvelį*. NaCl erdvinės gardelės elementarus narvelis yra kubas (21 pav., *a*).

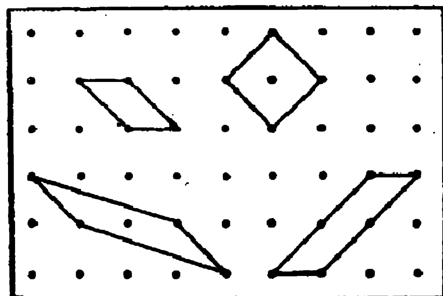
Paprasčiausi elementarūs narveliai yra kubas, erdvėje centruotas kubas, plokštumoje centruotas kubas, heksagonalinė prizmė (21 pav., *a, b, c, d*).

Prielaida, kad kristalų gardelė yra erdvinė, patvirtina mokslinio numatymo galimybę. Tuo laikotarpiu (XIX a. antroje pusėje) nebuvo įrodyta hipotezė, ir daugelis mokslininkų abejojo medžiagos molekulių ir atomų egzistavimu.

Žinios apie kristalų erdvinę gardelę padėjo išaiškinti daugelį kristalų savybių.



21 pav.



22 pav.

Pavyzdžiui, žinoma, kad idealios formos kristalas yra apribotas plokščiomis sienomis ir tiesiomis briaunomis.

Šį faktą galima paaiškinti tuo, kad idealaus kristalo plokštumos ir briaunos visada eina per erdvinės gardelės mazgus.

Taip pat paaiškėjo, kodėl tos pačios medžiagos kristalai gali būti įvairios formos. Kaip iš plokščio tinklelio galima iš-

pjauti skirtingų formų plokščias figūras (22 pav.), taip ir kristalas, turintis tam tikrą erdvinę gardelę, gali būti įvairios formos.

Erdvinė gardelė paaiškina ir pagrindinį kristalografijos dėsnį — kampų pastovumo dėsnį. Jei kristalo siena *a* (6 pav.) jungiasi su viena jo plokštuma, o siena *b* — su kita, tai, aišku, kad kristalo forma (atskirų sienų matmenys) negali turėti įtakos tarp šių sienų esančio erdvinio kampo dydžiui. Jį nulemia tik kampas tarp erdvinės gardelės atitinkamų plokštumų.

Kristalo vidinės sandaros vaizdavimas erdvine gardele itin reikšmingas, aiškinant kristalų simetriją. Kristalų simetrijos įvairias rūšis galima įrodyti, remiantis erdvinės gardelės simetrija. Spalvotose įklijose *1* ir *2* parodytas kristalų išorinės formos ir jų erdvinių gardelių simetrijos ryšys.

Šio fakto įrodymas itin svarbus mokslui. E. Fiodorovo darbai kristalografiją pavertė griežtu teoriniu mokslu, ir jau XIX amžiaus pabaigoje jis pirmavo visuose kietųjų kūnų sandaros moksluose.

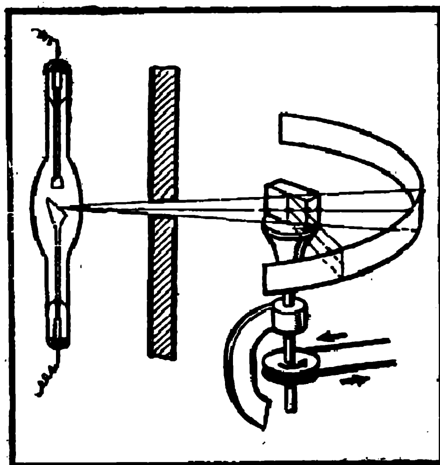
7 užduotis. Paruoškite pranešimą apie E. Fiodorovo gyvenimą ir mokslinę veiklą.

Literatūra. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1963.

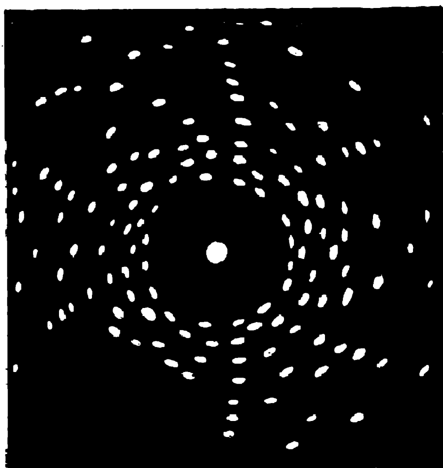
7. KRISTALŲ SANDAROS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Žinios apie kristalo erdvinę gardelę buvo hipotezė, kol 1912 m. ją visiškai patvirtino pirmieji eksperimentiniai duomenys.

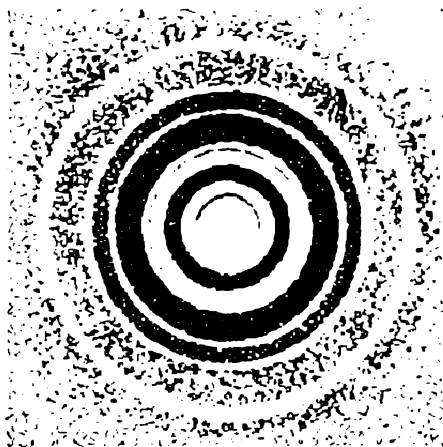
Kristalų vidinę sandarą galutinai patvirtino 1895 m. vokiečių fizikas V. Rentgenas (1854—1923), atradęs spindulius, kurie buvo



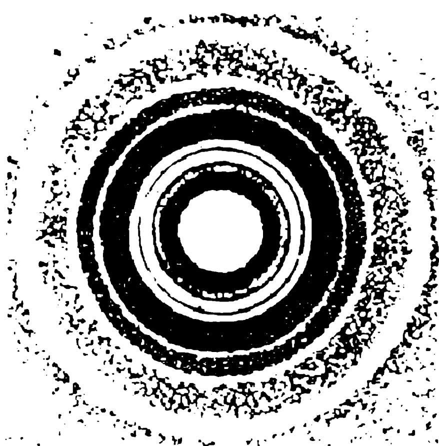
23 pav.



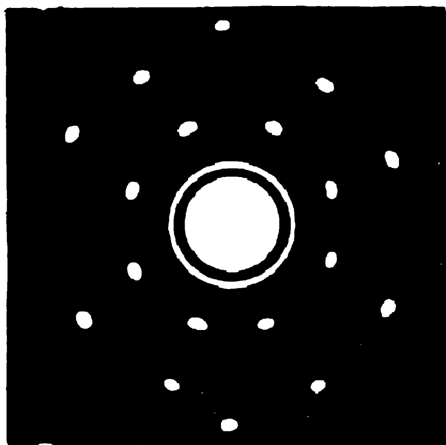
24 pav.



25 pav.



26 pav.



27 pav.

pavadinti *x* spinduliais ir kuriuos dabar visi vadina Rentgeno spinduliais.

1912 m. kitas vokiečių fizikas Maksas Laue (1879—1960) pasiūlė Rentgeno spindulius panaudoti kristalų vidinės sandaros tyrimui. Metodo schema tokia. Siauras Rentgeno spindulių pluoštas praleidžiamas pro monokristalą (23 pav.). Už monokristalo padėta fotoplokštelė, suvyniota į juodą popierių. Išryškintoje fotoplokštelėje, be centrinės dėmės — Rentgeno spindulių, praėjusių pro monokristalą neatsilenkiant, pėdsako, matyti kitos tam tikru būdu išsidėsčiusios dėmės, kurios susidaro, spinduliams išsisklaidant nuo kristalo atomų plokštumų (24 pav.). Netgi nemokėdami iššifruoti rentgenogramos, galime iš jos vaizdo spėti, kad dalelės kristale yra išsidėsčiusios dėsningai. Pagal tokią rentgenogramą specialistas lengvai nustatys ašies, lygiagrečios Rentgeno spinduliams, simetrijos eilę ir apskaičiuos daugelį kitų parametrų, apibūdinančių erdvinę gardelę.

Vėliau buvo sukurti kiti kristalų tyrimo Rentgeno spinduliais metodai.

Panagrinėsime dar vieną jų — miltelių metodą. Monochromatinių Rentgeno spindulių pluoštas krinta į presuotos polikristalinės medžiagos pavyzdį. Kristalo atomų plokštumos juos išsklaido kaip sistemos kūgių paviršių, kurių ašis yra pirminio pluošto kryptis. Fotojuostelė juosia pavyzdį koncentriškai ir joje atsispindėjusių spindulių kūgiai palieka pėdsaką — koncentrinių

žiedų serijas. Pagal atstumą tarp tų linijų galima apskaičiuoti atstumus tarp plokštumų kristale ir nustatyti jo elementarios gardelės rūšį.

Šie tyrimai puikiausiai patvirtino kristalo erdvinių gardelių struktūrą, kurią iš anksto 1890 m. numatė E. Fiodorovas, remdamasis simetrijos dėsniu. E. Fiodorovui teko laimė sulaukti savo teorijos triumfo.

Paskutiniais dešimtmečiais kristalų tyrinėjimui kartu su Rentgeno spinduliais buvo naudojami elektronų ir neutronų srautai. Elektronų srautą atomai išsklaido kur kas stipriau už Rentgeno spindulius. Todėl elektronografinis metodas yra jautresnis. Tačiau dėl tos priežasties elektronai į medžiagą įsiskverbia labai negiliai, ir todėl elektronografinis metodas pirmiausia buvo naudojamas plonų sluoksnių struktūroms tirti. 25 ir 26 paveiksle pateiktos plonų aukso ir vario plokštelių elektronogramos.

Sparčiai tobulinant branduolinius reaktorius, galima gauti intensyvius neutronų srautus, kurie taip pat gali būti panaudoti medžiagos struktūros tyrimui. Neutronai beveik visiškai nereaguoja su elektronais; juos išsklaido tik atomų branduoliai. Neutronai dėl to yra labai skvarbūs, o tai kartais labai svarbu. NaCl kristalo neutronograma pateikta 27 paveiksle.

LITERATŪRA I SKYRIUI

Бани Ч. Кристалы. Их роль в природе и науке. М., «Мир». 1970.
Вейль Г. Симметрия. М., «Наука», 1968.
Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Л., «Недра», 1968.
Шаскольская М. П. Кристаллы. М., Гостехиздат, 1956.
Шубников А. В. и Петров В. Ф. Зарождение и рост кристаллов. М., «Наука», 1960.

TARPUSAVIO SĄVEIKOS JĖGOS IR KRISTALŲ SANDARA

Pirmajame skyriuje buvo pasakojama, kaip, remdamiesi mokslu apie simetriją, mokslininkai išaiškino kristalų sandaros paslaptis. **Dabartiniais eksperimentiniais metodais galima „pamatyti", iššifruoti bet kurio kristalo sandarą.** Fizikos tikslas: išaiškinti kristalų sandarą, remiantis atomų sandara ir jų tarpusavio sąveika, suteikti kiekybinių duomenų, apibūdinančių šią sąveiką, remiantis ištirtomis kristalų savybėmis, numatyti kitas jų savybes.

Teoriškai sukurtą kiekybinį kristalo sandaros modelį po to reikia patikrinti eksperimentu. Jei eksperimentas patvirtina apskaičiuotų dydžių reikšmę, galima patikėti, kad teorija teisinga, ir, ja remiantis, galima ne tik išaiškinti žinomų medžiagų, bet ir numatyti naujų medžiagų sandarą bei savybes.

Kristalų sandaros fizikinės teorijos pagrindą sudaro mokymas apie atomo sandarą, apie jėgas, siejančias atomus medžiagos molekulėse. Fizikos ir chemijos užsiėmimuose šie klausimai jau buvo nagrinėti. Kad juos prisimintute, atlikite šias užduotis.

8 užduotis. Aprašykite pirmųjų 18 Mendelejevo periodinės elementų sistemos atomų sandarą.

9 užduotis. Paruoškite pranešimą tema: „Dujų molekulių, turinčių polinę ir nepolinę kovalentinę jungtį, sandara", „Dujų molekulių, turinčių joninę jungtį, sandara".

Literatūra. Chodakovas J. Neorganinės chemijos vadovėlis VII—VIII kl. K., 1978.

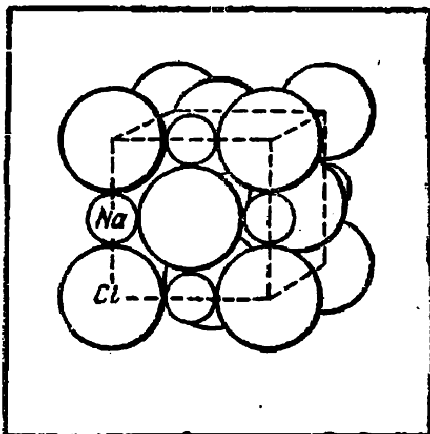
8. JUNGTIES JĖGŲ KRISTALUOSE PRIGIMTIS

Visapusiškai tiriant jungties jėgas kristaluose, įsitikinta, kad visus kristalus galima skirstyti į keturias grupes: joninius, molekulinius, atominius ir metalinius. Smulkiau panagrinėsime kiekvieną šių kristalų grupę.

Joniniai kristalai. Būdingus jų požymius galima pastebėti, kaip pavyzdį nagrinėjant valgomosios druskos kristalą.

Žinoma, kad NaCl molekulėje vienintelis natrio valentinis elektronas ilgiausiai būna prie chloro atomo. Tada susidaro teigiamas natrio jonas ir neigiamas chloro jonas, kurie vienas kitą veikia elektrinių jėgų dėka. Natrio jonas ir chloro jonas turi visiškai užpildytus elektroninius apvalkalus ir simetrinį elektroninį debesį. Tai reiškia, kad, medžiagos dalelėms suartėjant, kiekvienas natrio

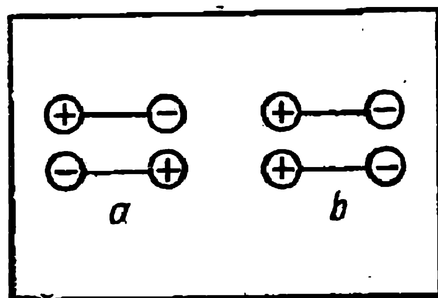
jonas reaguos ne su vienu kuriuo nors chloro jonu, bet stengsis prisijungti kuo didesnį jų skaičių. Analogiškai atsitiks ir su chloro jonu. Tada valgomosios druskos kristale apie kiekvieną chloro joną grupuosis natrio jonai, o apie kiekvieną natrio joną — chloro jonai; susidarys gerai žinoma valgomosios druskos struktūra (28 pav.).



28 pav.

Joninė jungtis gana stipriai sujungia medžiagos daleles kristale, todėl šie kristalai yra tvirti. Joniniai kristalai blogai praleidžia šilumą ir elektrą.

Šių kristalų būdinga savybė ta, kad juose negalima atskirti pavienių molekulių. Joniniame kristale kiekvienas teigiamas jonas vienodai stipriai susijungęs su visais jį supančiais neigiamais jonais (ir atvirkščiai). Taigi neįmanoma išskirti, pavyzdžiui, NaCl molekulę iš viso valgomosios druskos kristalo. Visas kristalas sudaro vieną didžiulę molekulę. Pavienių NaCl molekulių gali būti tik druskos garuose (skysčiuose, kaip žinoma, jos disocijuoja į jonus).



29 pav.

Molekuliniai kristalai. Tokių kristalų gardelės mazguose yra molekulės, turinčios nepolinę kovalentinę jungtį. Šių medžiagų pavyzdžiai yra H_2, Cl_2, O_2 ir kt. dujos. Kaip jūs žinote iš chemijos kurso, susidarant šioms molekulėms, kiekvieno atomo išorinis elektroninis apvalkalas užsipildo, „suvisuomeninant“ valentinių elektronų poras. Kadangi elektronų poros vienodai priklauso kiekvienam atomui, tai atomo teigiamo krūvio centras sutampa su neigiamo krūvio centru, ir dėl to molekulė yra elektriškai neutrali, neįkrauta. Kaipgi kietoje būklėje molekulės išsilaiko viena prie kitos? Kvantinė teorija tai aiškina taip.

Nepolinėse molekulėse jų elektroninio debesies centras ir branduolio centras sutampa tik apytikriai, kiekvienu atskiru laiko momentu, elektronui judant apie branduolį, centrai gali ir nesutapti. Taigi atskirais laiko momentais molekulė tampa elektriniu dipoliu [1].

[1] Elektriniu dipoliu vadinama dviejų vienodo absoliutinio didumo priešingų ženklų taškinių krūvių, nutolusių vienas nuo kito tam tikru atstumu, visuma.

Šie dipoliai vienas kitą traukia, jeigu yra išsidėstę taip, kaip parodyta 29 pav., *a*, (tuo atveju skirtingų ženklų krūviai yra arčiau vienas kito, negu to paties ženklo) arba stumia vienas kitą, jei erdvėje išsidėstę taip, kaip parodyta 29 pav., *b*. Tačiau vidutiniškai šios molekulės ilgesnį laiko tarpą būna tokiose padėtyse, kuriose molekuliniai dipoliai vieni kitus ilgiau traukia, negu stumia. (Tarpmolekulinės jėgos, kurias nulemia tokie du priešingi veiksniai, yra silpnos.) Šios silpnos tarpmolekulinės sąveikos jėgos vadinamos van der Valso jėgomis.

Tokiuose kristaluose van der Valso jungtis tarp molekulių palyginti silpna, todėl šios medžiagos trapios, lengvai išgarinamos, jų virimo, lydymosi temperatūra žema.

Šie kristalai vadinami molekuliniais kristalais todėl, kad juose lengvai galima atskirti medžiagos molekules, nes kovalentinė jungtis tarp atomų yra stipresnė už van der Valso jungtį tarp molekulių.

Atominiai kristalai. Žinoma, kad atomų kovalentinės jungties pagrindas yra jų išorinių elektronų „suporavimas“, susidarant visiškai užpildytam valentinių elektronų apvalkalui. Taip įvykti gali, jungiantis Mendelejevo periodinės sistemos pirmos grupės atomams su septintos grupės atomais, antros grupės atomams jungiantis su šeštos grupės atomais, septintos grupės atomams jungiantis tarpusavy ir t. t. Kitaip tariant, gali susidaryti $A_I B_{VII}$, $A_{II} B_{VI}$, $A_{VII} B_{VII}$ tipo molekulės.

Atrodytų, kad niekas netrukdo ketvirtos grupės atomams (angliai, siliciui, germaniui) susijungti su panašiais į juos atomais, susidarant $A_{IV} B_{IV}$ tipo molekulėms. Tačiau anglies, silicio, germanio molekulių gamtoje nėra. Kodėl?

Panagrinėkime tai, imdami pavyzdžiu anglį (deimantą).

Kai susitinka du vienodi (vadinasi, ir lygiateisiai) anglies atomai, netikslinga laukti, kad vienas atomas atiduos kitam visus savo elektronus, tuo visiškai užpildydamas jo elektroninį apvalkalą. Tikslingiau laukti, kad kiekvienas anglies atomas kovalentinės jungties tarp jų sudarymui „pasiūlys“ po vieną elektroną. Tačiau tuo atveju kiekvieno anglies atomo trys jungtys liks neužpildytos (arba, kaip sakoma, neprisotintos). Todėl kiekvienas anglies atomas gali prisijungti dar tris anglies atomus, iš kurių kiekvienas gali ir pats padaryti tą patį. Galų gale susidaro deimanto kristalas, sudarytas iš anglies atomų, kurie tarpusavy sujungti kovalentinėmis jungtimis. Kadangi tokiame kristale visos jungtys vienodos, tai iš jo išskirti anglies molekulę neįmanoma. Visas kristalas sudaro vieną, sudarytą iš daugybės anglies atomų, didžiulę molekulę.

Panašiai kristalizuojasi germanis, silicis — medžiagos, artimos savybėmis ir esančios toje pačioje Mendelejevo periodinės sistemos grupėje.

Kristaluose kovalentinės jungtys labai stiprios. Todėl turintys

tokią jungtį atominiai kristalai yra kieti, lydosi aukštoje temperatūroje; tai matyti iš deimanto pavyzdžio.

Metaliniai kristalai. Kiekvieno metalo atomas turi neužpildytą valentinį elektroninį apvalkalą. Natrio, kalio apvalkalas turi ne aštuonis, o vieną elektroną, magnio — du, aliuminio — tris elektronus. Geležies, kobalto, nikelio atomai išoriniame apvalkale turi ne 18, o 8 elektronus ir t. t. Metalo atomams suartėjant, kiekvienas jų yra pasiruošęs suteikti galimybę elektronams užimti elektroniniame apvalkale neužpildytas vietas. Tačiau... tam neužtenka elektronų. Jungiantis dviem metalo atomams, jų elektronams atsiranda galimybė judėti apie kiekvieną atomą. Jungiantis kitiems metalo atomams, galimybė elektronams judėti didėja. Taigi metalo kristalą galima įsivaizduoti kaip joninę gardelę, sudarytą iš metalo atomų, neturinčių valentinių elektronų, ir elektroninių dujų, „cementuojančių" iš teigiamai įkrautų jonų sudarytą gardelę.

Metaluose elektronai sudaro elektronines dujas, todėl jie gerai praleidžia elektrą ir šilumą.

Parodytas dalelių (atomų, jonų, molekulių) jungties jėgų vaizdas kristaluose yra kokybinis ir dėl to apytikslis. Gamtoje šie keturi jungties rūšių kietuose kūnuose atvejai niekuomet gryni nepasitaiko. **Paprastai jungtys kietuose kūnuose tarp dalelių yra įvairių jungties tipų junginys (kombinacija).** Daugumoje kristalų pastebima mišri joninė-kovalentinė jungtis. Net tokia klasikinė joninė jungtis tarp valgomosios druskos jonų Na^+ ir Cl^- tik 80% yra joninė. Natrio atomas, negalėdamas „susitaikyti" su tuo, kad neteko elektrono, jį traukia prie savęs, ir elektronas kurį laiką būna tarp jonų, suteikdamas jungčiai kovalentiškumo „atspalvį".

Kaip paaiškėja iš skaičiavimų, van der Valso jungtis visuomet esti su jonine-kovalentine jungtimi. Nors vidiniai visų atomų (išskyrus vandenilio atomą) apvalkalai visada užpildyti, elektronams judant, jų neigiamų krūvių centras gali nesutapti su teigiamai įkrauto branduolio centru.

9. KRISTALŲ STRUKTŪRA

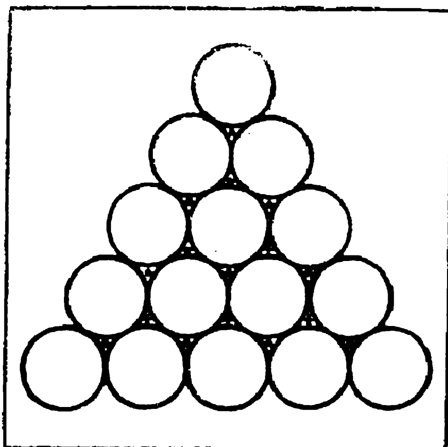
Jungčių, veikiančių kristale tarp dalelių (jonų, atomų, molekulių), rūšis turi įtakos kristalo struktūrai, dalelių išsidėstymo jame pobūdžiui.

Jonų, metalų ir van der Valso sąveikos jėgos yra simetrinės ir nėra orientuotos. Tikrai matėme, kad joniniame kristale bet kuris jonas stengiasi iš visų pusių pritraukti prie savęs priešingo ženklo jonus. Tokios pat simetrinės jungties jėgos veikia molekuliniuose ir metaliniuose kristaluose.

Dėl simetrinio jungties jėgų pobūdžio jonai (o molekuliniuose kristaluose — molekulės) yra glaudžiai supakuoti. Tokiuose kristaluose dalelės išsidėsčiusios panašiai kaip rutuliai kokiame nors tūryje. Kad suprastume kristalų struktūrą, panagrinėkime rutulių glaudaus supakavimo dėsnius.

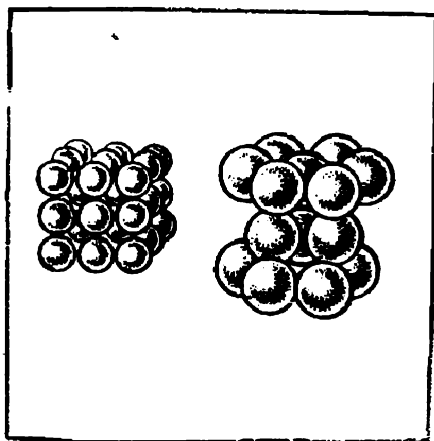
Panagrinėkime atvejį, kai visi rutuliai vienodi:

Pirmąjį rutulių sluoksnį galima glaudžiai sudėti vieninteliu būdu, kaip parodyta 30 paveiksle. Tuo atveju kiekvienas rutulys turi 6 kaimynus.



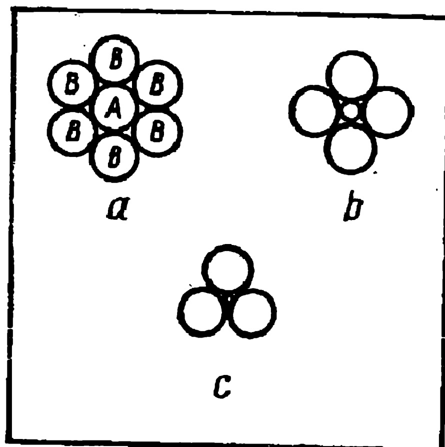
30 pav.

Kad gerai priglustų, antrojo sluoksnio rutuliai turi įeiti į pirmojo sluoksnio įdubimus. To paties dydžio rutuliais užpildyti visų įdubų neįmanoma, todėl įdubimai užsipildo tik kas antras. (Tarkime, kad kryželiais pažymėti įdubimai lieka tušti, o taškais pažymėti — užpildyti rutuliais.) Aišku, glaudaus supakavimo pobūdis nepasikeistų, jeigu rutuliais būtų užpildyti įdubimai, pažymėti kryželiais. Kitaip tariant, du sluoksnius glaudžiai supakuoti galima taip pat vieninteliu būdu. Tuo atveju kiekvienas pirmojo sluoksnio rutulys turės 9 kaimynus (6 pirmame sluoksnyje ir 3 viršuje).



31 pav.

Tris sluoksnius glaudžiai supakuoti galima dviem skirtingais būdais. Suprantama, kad glaudžiau supakuotume, turime trečiojo sluoksnio rutulius dėti į antrojo sluoksnio įdubimus. Tačiau tuo atveju trečiojo sluoksnio rutulius galima išdėstyti taip, kad jų centrai būtų virš pirmojo sluoksnio įdubimų (30 paveiksle pažymėtų kryžiuku), arba taip, kad jų centrai būtų virš pirmojo sluoksnio rutulių centrų. Šie du supakavimo trimis sluoksniais būdai yra vienodai glaudūs, tačiau struktūriškai jie vienas nuo kito skiriasi (31 pav.). Pirmąjį jų atitinka kubinis plokštumoje centruotas elementarus narvelis, antrąjį — heksagonalinis. Tada kiekvienas atomas įpakavimo viduje turi 12 kaimynų.



32 pav.

Tačiau gamtoje glaudaus supakavimo atveju „kaimynų" skaičius (arba, kaip sako fizikai, koordinacinis skaičius) gali būti lygus ne tik 12, bet ir 8, 6, 4, arba net 2, priklausomai nuo jonų (atomų) dydžio.

Panagrinėkime plokščio rutulių supakavimo pavyzdį (32 pav.). Rutulys *A* (32 pav., *a*) turi 6 kaimynus rutulius *B*, jei šių rutulių spinduliai vienodi ($r_A = r_B$). Tačiau, kai rutulio *A* skersmuo mažesnis, prie jo gali prisišlieti tik keturi rutuliai, ir simetriškai jie išsidėstys taip, kaip parodyta 32 paveiksle, *b*. Jei rutulio skersmuo dar mažesnis, tai su juo gali liestis ne daugiau kaip trys rutuliai *B* (32 pav., *c*) ir t. t. Taigi jonų „kaimynų" skaičius kristale priklauso nuo jonų spindulių santykio.

Įvairūs veiksniai turi įtakos jonų glaudžiam supakavimui kristale (sluoksnių skaičius, jonų didumas, jų skaičius medžiagoje), ir dėl to susidaro daug įvairių erdvinių gardelių.

10. ATOMINIŲ KRISTALŲ STRUKTŪRA

Molekuliniai, joniniai ir metaliniai kristalai turi glaudžiai supakuotą struktūrą todėl, kad jų jungties jėgos (joninės ir van der Valso) yra simetrinio, nekryptinio pobūdžio. Be to, šioms jėgoms neegzistuoja ribinis skaičius atomų, kuriuos jos gali veikti (koordinacinis skaičius priklauso ne nuo jungties pobūdžio, o nuo dalelių spindulio).

Kovalentinės jungtys yra visai kitokio pobūdžio. Nuo jų priklauso galimų atomo „kaimynų" skaičius kristale ir, be to, kryptinis pobūdis. Pavyzdžiui, anglies atomas kristale gali turėti tik keturis kaimynus, nes su jį supančiais atomais gali sudaryti tik keturias kovalentines jungtis. Be to, valentinių elektronų elektroninis apvalkalas atitinkamai išsidėstęs erdvėje; „suvisuomeninant" elektronus, elektronų debesys, iš dalies susikirsdami, išsidėsto grandine ir priverčia atomus užimti tiksliai nustatytą vietą erdvėje. Todėl kiekvienas anglies atomas atsiranda taisyklingo tetraedro viršūnėje (deimanto struktūra parodyta 19 paveiksle). Taigi **atominiai kristalai nėra glaudžiai supakuotos struktūros.** Ją nulemia atomo neprisotintų jungčių skaičius ir rūšis.

11. POLIMORFIZMAS

Nieko nestebina faktas, kad skirtingos įvairios cheminės sudėties medžiagos pasižymi labai skirtingomis savybėmis. Nuostabiau tai, kad visai skirtingų savybių įvairios medžiagos turi tą pačią cheminę sudėtį, pavyzdžiui, alavas. Tai būdingo blizgesio, baltas, kalus metalas, kaip ir visi metalai gerai praleidžiantis elektros srovę ir šilumą. Ir kartu su alavu palygintume kažkokius pilkos spalvos miltelius. Atrodo, kas šioms medžiagoms yra bend-

ra? Tačiau cheminė analizė rodo, kad šie milteliai — taip pat alavas.

Arba deimantas, viena iš kiečiausių medžiagų, dielektrikas. Prityrusios juvelyro rankos jį paverčia brilijantu, brangakmeniu, spindinčiu visomis savo briaunomis. Ką jis turi bendra su grafitu — juodu, lengvai skylančiu sluoksniais laidininku? Tačiau cheminė analizė rodo, kad grafitas, kaip ir deimantas, yra gryna anglis.

Deimanto ir grafito, pilkojo ir baltojo alavo skirtumas paaiškinamas jų kristalinės struktūros nevienodumu. Deimanto erdvinė gardelė tūrinė, grafito — plokščia, sluoksninė (20 pav.).

Medžiagos savybė turėti dvi (arba kelias) skirtingas kristalines struktūras vadinama *polimorfizmu*[1].

Polimorfizmas praktiškai būdingas visoms medžiagoms. Esant vienoms sąlygoms (temperatūrai ir slėgiui), energijos atžvilgiu naudingos vienos struktūros, esant kitoms — kitos. Pavyzdžiui, baltasis alavas žemoje temperatūroje virsta pilkuoju. Kai kurių medžiagų polimorfiniai kitimai gali vykti tik labai aukštame slėgyje.

Gamtoje pasitaiko ir priešingų atvejų, kai dvi skirtingos sudėties medžiagos turi panašias savybes tik todėl, kad panašios jų struktūros. Taip artimos yra kalcio karbonato $CaCO_3$ ir natrio nitrato $NaNO_3$, germanio ir silicio savybės.

Visa tai rodo, kad kietų kūnų savybės daug priklauso nuo jų vidinės sandaros.

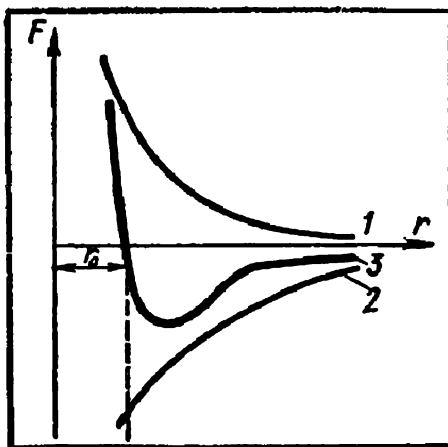
12. MOLEKULIŲ JUNGTIES ENERGIJA KRISTALE

Panagrinėkime dviejų dalelių sąveiką. Labai nutolusios dalelės (atomai arba molekulės) praktiškai viena kitos neveikia. Atomams (molekulėms) artėjant vienam prie kito, atsiranda ir tarpusavio traukos, ir atostūmio jėgos (atomo elektronai traukia šalia esančio atomo branduolį ir stumia elektronus). **Traukos ir atostūmio jėgos skirtingai priklauso nuo atstumo r tarp dalelių.** Mažėjant atstumui tarp dalelių, atostūmio jėgos didėja greičiau, negu traukos jėgos. 33 paveiksle *1* ir *2* linijomis pavaizduota tų jėgų priklausomybė nuo atstumo tarp dalelių. (Manoma, kad viena dalelė yra koordinačių pradžioje, o kita artėja prie jos iš begalybės.) Prisiminkime, kad traukos jėgos pasireiškia tarp skirtingo ženklo krūvių ir todėl yra neigiamos, o atostūmio jėgos pasireiškia tarp vienodo ženklo krūvių ir yra teigiamos. *3* linija rodo šių jėgų atstojamosios priklausomybę nuo atstumo tarp dalelių. Iš pradžių atstojamoji jėga pasireiškia kaip traukos jėga. **Nuotoliu r_0, apytikriai lygiu molekulių spindulių sumai, atostūmio jėga lygi**

---

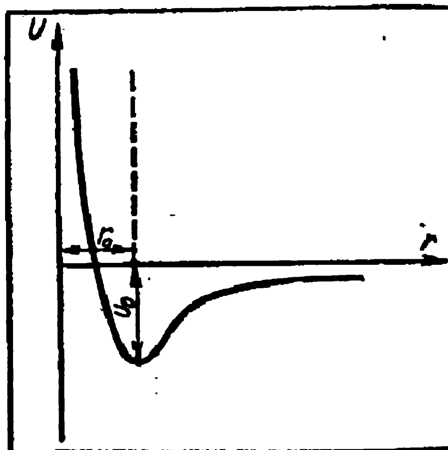
[1] Atsižvelgiant į polimorfizmą, kampų pastovumo dėsnį (§ 3) reikia suformuluoti tiksliau: visuose kristaluose, priklausančiuose tos medžiagos vienai polimorfinei modifikacijai, kampai tarp atitinkamų sienų yra pastovūs.

traukos jėgai, ir atstojamoji jėga lygi nuliui. Toliau mokulėms artėjant, atstojamoji jėga pasireiškia kaip atostūmio jėga ir, mažėjant nuotoliui, didėja labai greitai.



33 pav.

Žinodami jungties jėgų pobūdžio priklausomybę nuo atstumo, galime nustatyti ir dalelių sąveikos potencinės energijos priklausomybę nuo atstumo. Tarp labai nutolusių dalelių potencinė energija lygi nuliui. Dalelėms artėjant, reikia įvertinti tarp jų veikiančią traukos jėgą. Šios jėgos darbas yra teigiamas, jis turi įtakos dalelių kinetinės energijos didėjimui ir jų sąveikos potencinės energijos mažėjimui[1]. Taip vyksta, kol atstumas $r=r_0$. Toliau dalelėms vienai prie kitos artėjant, traukos jėgos viršys atostūmio jėgas (33 pav.). Atostūmio jėgos, veikdamos priešinga dalelių judėjimo kryptimi, atlieka neigiamą darbą, dėl to sąveikos potencinė energija labai padidėja (atitinkamai tokiu pat pobūdžiu kinta atostūmio jėga). Taške $r=r_0$ potencinė energija turi minimalią reikšmę, o sąveikos jėga lygi nuliui.



34 pav.

Dviejų dalelių sąveikos potencinės energijos kreivė parodyta 34 paveiksle.

Kristale visos dalelės yra nutolusios viena nuo kitos tokiais atstumais, kurie atitinka jų potencinės energijos minimumą. Be to, dalelės dar turi šiluminio judėjimo kinetinę energiją. Norint suardyti tarp dviejų dalelių jungties jėgas, reikia atlikti darbą, lygų U_0 (34 pav.). Dydis U_0 vadinamas dviejų dalelių jungties energija.

Atsižvelgiant į dalelių jungties energiją, galima paaiškinti, kodėl toje pačioje temperatūroje (pavyzdžiui, kambario) vienos medžiagos yra kietos, kitos — skystos, o trečios — dujinės. Žinoma,

---

[1] Iš IX kl. mechanikos kurso žinote, kad uždaroje sistemoje sąveikaujančių kūnų $A=-\Delta\Pi=\Delta K$.

kad vienatomių medžiagų šiluminio judėjimo energija $E=3/2\ kT$; čia k — Bolcmano konstanta, T — absoliutinė temperatūra. Jei toje temperatūroje šiluminio judėjimo energija kur kas didesnė už jungties energiją, tai medžiaga yra dujinėje būsenoje. Jei šiluminio judėjimo energija mažesnė už jungties energiją, tai medžiaga yra kietoje būsenoje. Skystos būsenos medžiagos jungties energija ir dalelių šiluminio judėjimo energija yra lygios.

10 užduotis. Paruoškite pranešimą tema „Paviršiaus įtempimas skysčiuose“.

Literatūra. B u c h o v c e v a s B. B. ir kt. Fizika. Mokymo priemonė X kl. K., 1976, V skyr.

13. KRISTALO PAVIRŠIAUS ENERGIJA

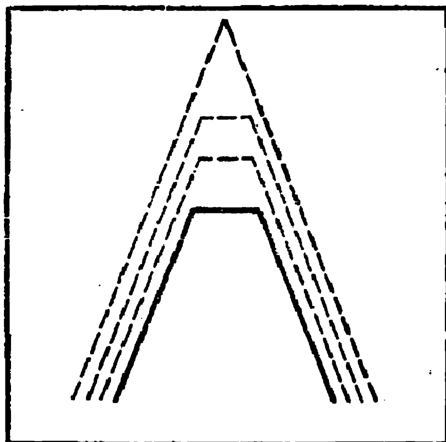
Kristalo paviršiuje esančios dalelės turi potencinės energijos perteklių, panašiai kaip šios energijos turi skysčio paviršiaus sluoksnio molekulės.

Potencinės energijos perteklius, kurį turi kristalo paviršiaus sluoksnio dalelės, vadinamas kristalo paviršiaus energija.

Paviršiaus energija, tenkanti paviršiaus ploto vienetui, vadinama *paviršiaus įtempimo koeficientu*. Paviršiaus įtempimo koeficientas žymimas raide α ir matuojamas J/cm^2.

Kristalų paviršiaus įtempimo koeficientas yra 10^{-5} J/cm^2 eilės dydis. Jis nevienodas ne tik skirtingiems kristalams, bet ir to paties kristalo skirtingoms sienoms.

Sienų paviršiaus energija turi įtakos formai, kurią įgis natūraliai susidarydamas kristalas. **Augdamas kristalas įgyja tokią formą, kuriai esant paviršiaus energijos reikšmė yra pati mažiausia.** Todėl sienų augimo greitis[1] yra proporcingas tų sienų paviršiaus energijai. Augimo procese greitai augančios sienos palaipsniui išnyksta. Tai pailiustruota 35 paveiksle. Todėl kristalai visuomet yra apriboti sienų, turinčių mažą paviršiaus energiją.



35 pav.

Tuo ir paaiškinamas vadinamasis kristalų regeneracijos reiškinys (t. y. taisyklingos jo formos atstatymas). Nupjovus kristalo viršūnę ir jį pamerkus į persotintą tirpalą, kristalas augs taip, kad jo dirbtinai sudarytos sienos, turinčios didelę α reikšmę, augs greičiau už kitas sienas ir išnyks. Dėl to kristalas „atstatys“ savo formą.

[1] Kristalo sienos augimo greitis suprantamas kaip tos sienos lygiagretaus jai pačiai poslinkio greitis.

Kristalo paviršiaus energijai didelę įtaką turi adsorbcinės plėvelės (adsorbcija — tai reiškinys, kai prie kieto kūno paviršiaus prilimpa kitų medžiagų molekulės). Medžiagos, kurių paviršius aktyvus, sumažina kristalo paviršiaus energiją, mažindamas jo tvirtumą. Šis reiškinys plačiai pritaikomas ir į jį atsižvelgiama pramonėje. Tekinimo staklėse vandeninės emulsijos naudojamos aušinimui. Į emulsiją pridėjus medžiagų, pasižyminčių paviršiaus aktyvumu, sumažinamas apdirbamos detalės tvirtumas, dėl to galima padidinti pjovimo greitį, sumažinti peilių susidėvėjimą ir t. t. Ieškant naftos, kartais tenka gręžti kietose naftingų sluoksnių uolienose keleto kilometrų gylio gręžinius. Tam reikia ypač tvirtų grąžtų, bet ir jie greitai išeina iš rikiuotės. Į gręžinį pumpuojant specialiai paruoštų medžiagų, pasižyminčių paviršiaus aktyvumu, kaip plaunamąjį tirpalą, gręžimo procesas palengvėja ir darosi ekonomiškesnis.

Paviršiaus aktyvumu pasižyminčių medžiagų įtaką kristalų tvirtumui atrado ir išnagrinėjo rusų mokslininkas P. Rebinderis bei jo mokiniai, todėl ji vadinama Rebinderio efektu.

11 užduotis. Paruoškite pranešimą tema „Rebinderio efektas".

Literatūra. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные вещества. М., «Знание», 1961.

Горюнов Ю. В. и др. Эффект Ребиндера. М.. «Наука», 1966.

LITERATŪRA II SKYRIUI

Китайгородский А. И. Порядок и беспорядок в мире атомов. Изд. 4-е. М., «Наука», 1966.

Китайгородский А. И. и Федин Э. И. Атомное строение и свойства твердых тел. М., «Знание», 1963.

Даниленко В. М. Что такое твердое тело? Киев, Изд-во АН РСФСР, 1963.

Холден А. Что такое ФТТ. Основы современной физики твердого тела. М., «Мир», 1971.

Ходаков Ю. В. Архитектура кристаллов. М., «Просвещение», 1970.

KIETŲJŲ KŪNŲ ŠILUMINĖS SAVYBĖS

Pagrindiniame fizikos kurse buvo nagrinėtos kai kurios kietųjų kūnų šiluminės savybės, pavyzdžiui, kūnų plėtimasis šildant, šiluminis laidumas ir šiluminis talpumas. Šio skyriaus tikslas — paaiškinti šias savybes, remiantis kietųjų kūnų struktūra, dalelių, iš kurių jie sudaryti, tarpusavio sąveika ir judėjimu.

Toliau mums dažnai teks kalbėti apie dalelių svyravimą. Todėl pirmiausia su šiuo judėjimu ir susipažinsime.

14. SVYRAVIMAS IR BANGAVIMAS

Gamtoje, be įvairiai vykstančių judėjimų, labai dažnai susiduriama su periodiškai pasikartojančiu judėjimu. Jam priskiriamas, pavyzdžiui, medžio šakų ir kamienų svyravimas, pučiant vėjui, laivų supimasis bangose, laikrodžio svyruoklės svyravimas. Tai svyravimas, arba svyruojamasis judėjimas.

Svyravimas yra toks judėjimas arba būsenos kitimas, kai fizikinių dydžių, apibūdinančių tą būseną arba judėjimą, reikšmės tam tikru būdu, laikui bėgant, pasikartoja.

Iš daugelio svyravimų galima išskirti judėjimą, kurį apibūdina fizikinių dydžių, pasikartojančių per lygius laiko tarpus, reikšmės. Tokios rūšies svyravimai vadinami periodiškais. Paprasčiausias periodiško svyravimo pavyzdys — laikrodžio svyruoklės judėjimas, skambančios stygos virpėjimas.

Nežiūrint daugybės įvairių svyravimų, jiems visiems būdingi kai kurie bendri dydžiai.

Panagrinėkime spyruoklinės svyruoklės judėjimą (36 pav.). Svyruoklę sudaro masyvus rutulys, pritvirtintas prie vienu galu nejudomai įtvirtintos spyruoklės. Rutulys užmautas ant horizontalaus strypo ir gali laisvai juo slankioti, tai ištempdamas, tai suspausdamas spyruoklę.

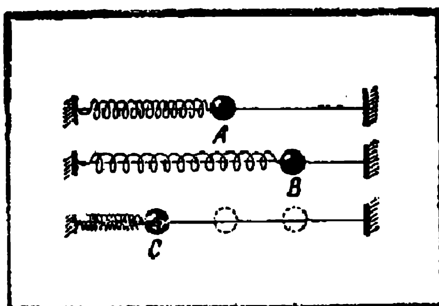
Visos pusiausvirą rutulį veikiančios jėgos yra išbalansuotos. Pakeiskime svyruoklės padėtį. Rutulį atitraukime į dešinę. Tuomet spyruoklė išsitemps ir joje atsiras tamprumo jėga, kuri stengsis svyruoklę grąžinti į pusiausvyros padėtį. Tos jėgos veikiama svyruoklė pradės grįžti į pusiausvyros padėtį, tačiau į ją grįžusi nesustos, o iš inercijos praeis ir atsilenks į kairę, suspausdama spyruoklę. Spyruoklėje vėl atsiras tamprumo jėga, kuri trukdys jai susispausti, ir svyruoklė sustos kairėje ribinėje padėtyje, o vėliau, veikiama tos tamprumo jėgos, pradės judėti į pusiausvyros padėtį. Procesas pasikartos, t. y. rutulys svyruos apie pusiausvyros padėtį. Šios spyruoklinės svyruoklės svyravimo priežastis yra spyruoklės tamprumo jėga ir rutulio inercija.

Kiekvieną svyravimą galima apibūdinti šiais dydžiais:

1) *visas svyravimas* — svyruoklės judėjimas nuo taško *B* (36 pav.) iki taško *C* ir atgal. Per visą svyravimą kūnas du kartus praeina kiekvieną trajektorijos tašką.

2) *amplitudė* — didžiausias svyruoklės nukrypimas nuo pusiausvyros padėties, žymimas raide *A*.

3) *periodas* — vieno viso svyravimo laikas, matuojamas sekundėmis ir žymimas raide *T*.



36 pav.

4) *dažnis* — svyravimų skaičius per 1 s, žymimas raide ν. Dažnio matavimo vienetas 1 hercas (Hz); 1 Hz — tai toks dažnis, kai per 1 s atliekamas vienas visas svyravimas. Jei svyravimų dažnis 50 Hz, tai reiškia, kad per 1 s atliekama 50 visų svyravimų. Dažnį ir periodą sieja tokia formulė

$$T=\frac{1}{\nu}.$$

Kad spyruoklinė svyruoklė pradėtų judėti, reikia jai suteikti tam tikrą energijos atsargą. Po to ji svyruoja, veikiama vidinių jėgų. **Tokie svyravimai, kurie vyksta veikiami vidinių jėgų, svyruoklę išvedus iš pusiausvyros padėties, vadinami laisvaisiais.** Laisvieji svyravimai negali vykti be galo ilgai, nes svyruoklei suteikta energija, laikui bėgant, sunaudojama oro pasipriešinimui, trinties jėgoms tarp rutulio ir strypo nugalėti ir t. t. Dėl to svyravimų amplitudė palaipsniui mažėja ir svyravimai užgęsta. Kad svyravimai neužgestų, reikia periodiškai veikiant išorine jėga, papildyti svyruoklei suteiktą energijos atsargą. **Svyravimai, kurie vyksta veikiant išorinei periodiškai jėgai, vadinami priverstiniais.**

Svyravimai, sužadinti kurioje nors vietoje, nepasilieka tik joje, o plinta erdvėje. **Svyravimų plitimas erdvėje yra bangavimas.**

Kiekvieną bangą apibūdina *bangos ilgis* (λ). **Bangos ilgis — tai nuotolis, kurį svyravimas aplinkoje sklinda per laikotarpį, lygų vienam svyravimų periodui.** Žinant bangos ilgį ir svyravimų periodą, galima nustatyti svyravimų plitimo greitį. Kai per vieną periodą svyravimai plinta atstumu, lygiu bangos ilgiui, bangos plitimo greitį galima nustatyti, padalijus bangos ilgio reikšmę iš svyravimų periodo reikšmės, t. y. $v=\frac{\lambda}{T}$.

Kadangi $T=\frac{1}{\nu}$, tai $v=\lambda\nu$, t. y. bangos plitimo greitis lygus bangos ilgio ir svyravimų dažnio sandaugai.

12 užduotis. 1. Paaiškinkite spyruoklinės svyruoklės laisvųjų svyravimų procesą, taikydami energijos tvermės ir kitimo dėsnį.

2. Pateikite laisvųjų ir priverstinių svyravimų pavyzdžių.

3. Atsakykite į klausimus: a) į kur nukreiptas svyruojančio rutulio, esančio ribiniuose taškuose, pagreitis? b) kuriose padėtyse didžiausias svyruojančio rutulio pagreitis ir greitis?

15. ŠILUMINIS JUDĖJIMAS

Kaip žinote, gamtoje visi kūnai,— ir kieti, ir skysti, ir dujiniai — sudaryti iš daugelio labai mažų dalelių — molekulių ir atomų,— kurios visą laiką chaotiškai juda, arba, kaip sakoma, yra šiluminio judėjimo būsenoje. **Skirtingų agregatinių būsenų medžiagos dalelių šiluminio judėjimo pobūdis yra skirtingas.** Tai aiškinama tuo, kad dalelių sąveikos jėgos priklauso nuo atstumo tarp dalelių. Nors dalelių tarpusavio sąveikos jėgų prigimtis ir dydis skirtingoms agregatinėms būsenoms yra skirtingi, tačiau visoms medžiagoms tų jėgų priklausomai nuo nuotolio kitimo pobūdis yra vienodas. Kokybiškai ši priklausomybė buvo išnagrinėta § 12. Iš grafiko (33 pav.) matyti, kad sąveikos jėgos, didėjant nuotoliui, staigiai mažėja ir, jau nutolus per du tris atomo skersmenis, praktiškai yra lygios nuliui. Kur kas stipriau dalelės sąveikauja su kaimyninėmis dalelėmis.

Sąveikaujančios dalelės turi tarpusavio potencinės energijos. Potencinės energijos grafikas (34 pav.) vaizduojamas kaip „potencinė duobė". Ši „duobė" yra giliausia pusiausvyros padėtyje. Vadinasi, sąveikaujančios dalelės pastoviosios pusiausvyros padėtyje turi mažiausią potencinę energiją, o tai visiškai atitinka bendrą principą: sistema patvari, jeigu jos energija yra mažiausia.

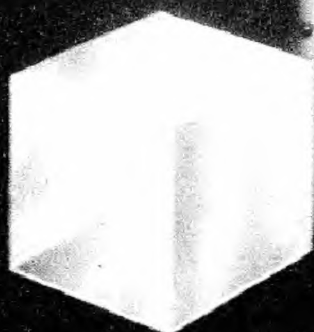
Taigi **sąveikaujančios dalelės yra pastovios pusiausvyros būsenoje, kai veikiančios tarp jų sąveikos jėgos lygios nuliui ir jų potencinė energija yra mažiausia.**

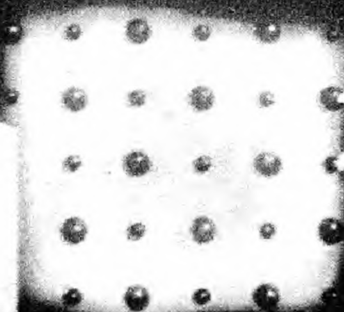
Pusiausvyros padėties potencinė energija apibūdina dalelių jungčių tvirtumą ir todėl vadinama jungties energija. Šis dydis parodo, kokį reikia atlikti darbą, norint daleles atitolinti vieną nuo kitos per tokį nuotolį, kuriuo nepasireikštų jų sąveika.

Potencinės „duobės" „gylis" nusako medžiagos galimybę būti skirtingų agregatinių būsenų. Iš pagrindinio fizikos kurso žinote, kad dalelių netvarkingo šiluminio judėjimo kinetinę energiją nusako dydis kT; čia k — Bolcmano konstanta, T — absoliutinė temperatūra.

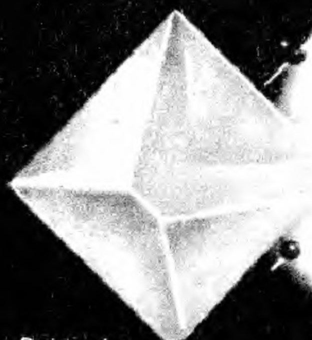
→

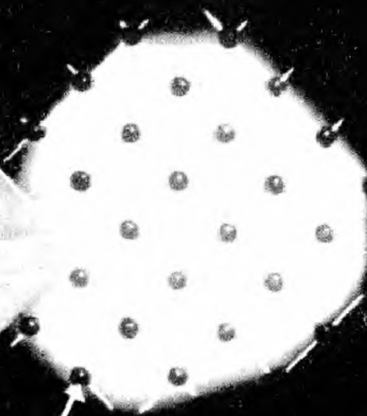
Akmens druskos NaCl, deimanto C, kalcito $CaCO_3$ kristalų idealios formos ir jų erdvinių gardelių projekcijos išilgai kurios nors simetrijos ašies (akmens druskos ir deimanto tūrinės erdvinės gardelės pateiktos tekste 18 ir 19 paveiksluose). Čia aiškiai pastebimas ryšys tarp atitinkamo kristalo erdvinės gardelės simetrijos ir jo išorinės formos.

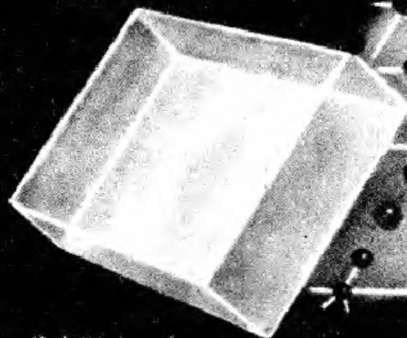


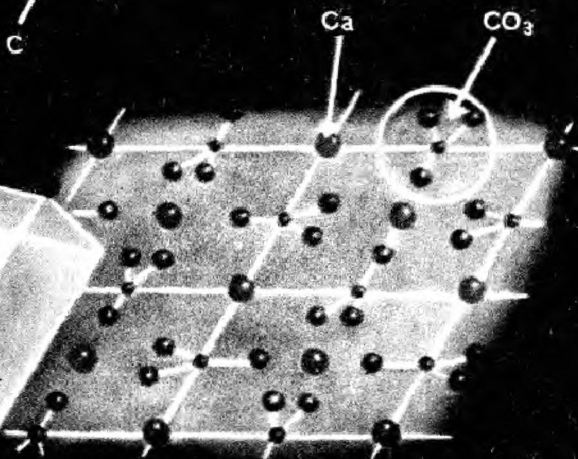








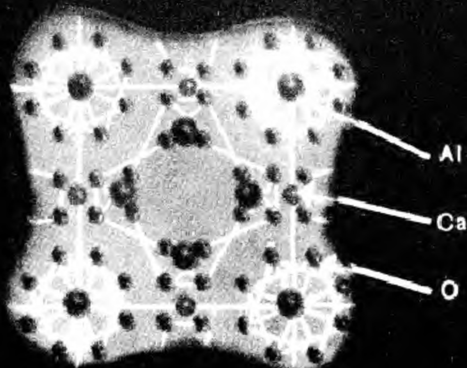


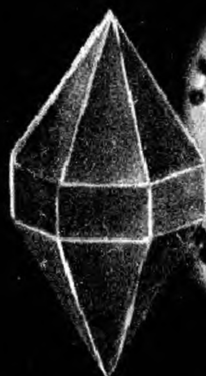


1

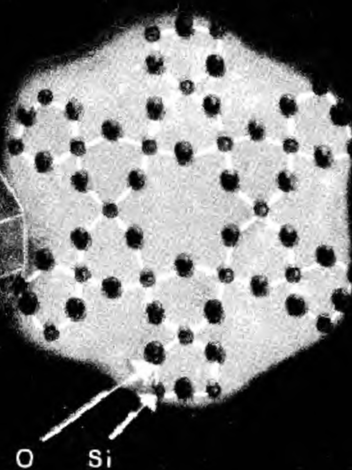


Granatas

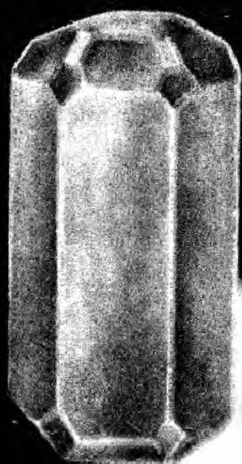


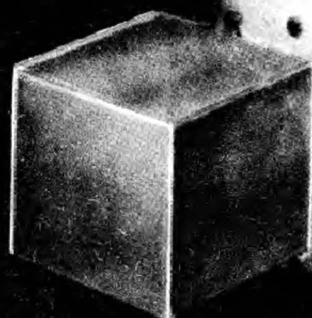


Kvarcas

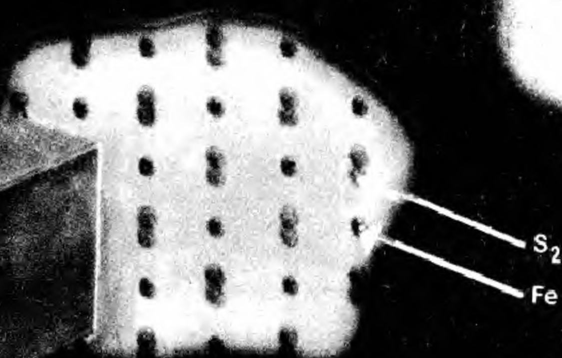


Smaragdas





Piritas



2

Kietame kūne sąveikaujančios dalelės palyginti yra arti viena nuo kitos (10^{-10} m eilės nuotoliu). Jų minimali tarpusavio sąveikos potencinė energija kur kas didesnė už šiluminio judėjimo kinetinę energiją ($kT \gg U_{min}$). Todėl kieto kūno dalelių judėjimas yra netvarkingas svyravimas aipe pusiausvyros padėtį — kristalinės gardelės mazgus. Jei kieto kūno dalelė išeina iš pusiausvyros padėties, tai ją veikiančių artimiausių dalelių jėgos viena kitos nebeatsveria. Neatsveriančios jėgos stengiasi dalelę grąžinti į išeities padėtį, t. y. į pusiausvyros padėtį. Judėdama atgal, iš inercijos dalelė pereina pusiausvyros padėtį ir, veikiama jėgų, vėl stengiasi į ją grįžti. Toks dalelės judėjimas apie pusiausvyros padėtį pasikartoja daug kartų, kitaip sakant, ji tam tikru dažniu pradeda svyruoti. Iš tikrųjų svyravimo apie pusiausvyros padėtį pobūdis yra daug sudėtingesnis, nes kiekviena dalelė susijusi ne tik su dviem artimiausiais „kaimynais", bet ir su visomis kitomis, arčiau esančiomis dalelėmis. Be to, jungties jėgos su skirtingomis kaimyninėmis dalelėmis gali būti skirtingos. Dėl to per periodą dalelė atliks pakankamai sudėtingą judėjimą. Panašiai svyruos ir kitos gardelės dalelės.

Taigi **kieto kūno dalelių judėjimą galima laikyti svyravimu.** Tokį judėjimą gali sukelti ne tik išorinės jėgos, jis gali atsirasti ir dėl šiluminio sužadinimo ir todėl vadinamas šiluminiu. Dalelių svyravimų amplitudė, kylant temperatūrai, didėja, tačiau ir lydymosi temepratūroje ji bus mažesnė už nuotolį iki kaimyninės dalelės. Daugeliui kristalų ji nebūna didesnė kaip 10^{-9} cm; tai sudaro maždaug 10% nuotolio iki artimiausios, esančios pusiausvyros padėtyje, dalelės.

Vienai dalelei išėjus iš pusiausvyros padėties, pasikeičia tos dalelės jėgos, veikiančios kaimynines daleles, todėl ir jos išeina iš pusiausvyros padėties. Į šį procesą įsijungs vis labiau nuo pradinės dalelės nutolusių kitų dalelių: kristalinėje gardelėje svyravimas ims plisti atskirose plokštumose, t. y. joje atsiras bangos. Bangos, atsiradusios kristale, yra tam tikro ilgio, kuris priklauso nuo kristalo matmenų ir tamprumo savybių. Šių bangų sklidimo mechanizmas analogiškas garso bangų sklidimo mechanizmui, o bangos sklidimo greitis sutampa su garso greičiu. Jų dažnumas gali būti skirtingas: nuo 10^2 iki 10^{13} Hz.

Atrodytų, kad absoliutinio nulio temperatūroje kristalinės gardelės dalelės turėtų nejudėti, nes tada nebūna šiluminio sužadinimo. Tačiau tai prieštarauja kvantinės mechanikos dėsniams, pa-



Granato $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$, kvarco SiO_2, pirito FeS_2 kristalų idealios formos ir jų erdvinių gardelių projekcijos išilgai kurios nors simetrijos ašies (dėl granato erdvinės gardelės sudėtingumo pavaizduota tik jos dalis. Silicio atomai uždengti kalcio atomais).

Čia matyti, kad kvarco erdvinė gardelė, kaip ir kvarco kristalai, turi šeštos eilės simetrijos ašį. Pirito ir akmens druskos kristalai, pasižymintys vienoda išorine forma, turi panašias erdvines gardeles.

gal kuriuos net absoliutinio nulio temperatūroje dalelės negali būti ramybės būsenoje. Toje temperatūroje dalelių, sudarančių kristalinę gardelę, sistema turės tam tikrą mažiausią energijos reikšmę, vadinamą nuline energija.

Jei molekulių šiluminio judėjimo kinetinė energija daug didesnė už jų sąveikos minimalią potencinę energiją ($kT \ll U_{min}$), tai reiškia, kad šiluminis judėjimas vyksta labai intensyviai ir molekulėms neleidžia jungtis į grupes po kelias daleles. Tuo atveju molekulių judėjimas yra visiškai netvarkingas ir medžiaga yra dujinės būsenos.

Jei dalelių šiluminio judėjimo kinetinė energija apytiksliai lygi jų sąveikos minimaliai potencinei energijai ($kT \approx U_{min}$), tai medžiaga yra skystos būsenos. Skysčio dalelių šiluminio judėjimo pobūdis sudėtingas. Judėjimas, kaip ir kristaluose, vyksta svyruojant apie pusiausvyros padėtį. Tačiau skysčio dalelių pusiausvyros padėtis nelieka nekintama.

13 užduotis. 1. Kristalinės gardelės dalelė išėjo iš pusiausvyros padėties x ašies kryptimi. Kaip pasikeis tą dalelę veikiančių artimiausių kaimyninių dalelių jėgos, išsidėsčiusios išilgai x ašies? Atsakydami naudokitės sąveikos jėgų priklausomybės nuo nuotolio tarp dalelių grafiku, parodytu 33 paveiksle.

2. Paruoškite pranešimą tema „Kietojo kūno dalelių sąveikos jėgų prigimtis".

Literatūra. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Изд. 2-е. Т. 1. М., «Наука», 1974, p. 299—305.

Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, p. 334—346.

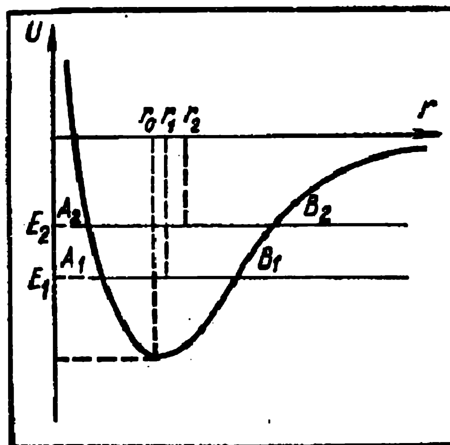
16. ŠILUMINIS KIETŲJŲ KŪNŲ PLĖTIMASIS

Šildomi visi kūnai plečiasi. Kokia gi kietųjų kūnų šiluminio plėtimosi priežastis?

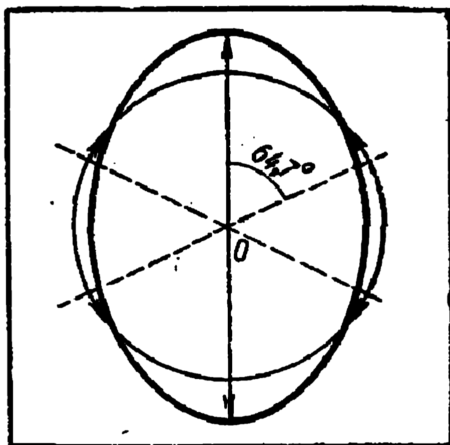
Kylant temperatūrai, didėja kristalinės gardelės mazguose esančių atomų svyravimo amplitudė. Kadangi visų kieto kūno atomų amplitudės padidėja vienodai, tai vidutinis atstumas tarp dviejų gretimų atomų nekinta, ir todėl, kylant temperatūrai, svyravimo amplitudės padidėjimas dar nesukelia šiluminio plėtimosi.

Kad išsiaiškintume šiluminio plėtimosi prigimtį, panagrinėkime dviejų kieto kūno dalelių sąveikos potencinės energijos grafiką (37 pav.). r_0 aplinkoje potencinės energijos kreivė yra asimetrinė, t. y. jos forma skiriasi nuo parabolės.

Mechanikos kurse buvo nagrinėtos tamprumo jėgos. Tamprumo arba kvazitamprumo jėgą $F=-kx$ atitinka potencinė energija $U=\frac{kx^2}{2}$. Potencinės energijos priklausomybės nuo poslinkio grafikas tuo atveju yra parabolė. Kietojo kūno potencinės energijos kreivės pobūdis patvirtina, kad tarp jo dalelių veikiančios jėgos nėra kvazitamprumo jėgos. Būtent šis faktas ir yra kietųjų kūnų šiluminio plėtimosi priežastis. Paaiškinsime tai. Potencinės ener-



37 pav.



38 pav.

gijos grafike (37 pav.) pažymėsime pilnutinės energijos reikšmes, atitinkančias dvi kietojo kūno skirtingas temperatūrines būsenas. Tarkime, kad pilnutinė energija E_1 atitinka temperatūrą T_1, o pilnutinė energija E_2 — temperatūrą T_2, be to, $T_2 > T_1$.

Temperatūroje T_1 dalelės atsilenks į kairę iki taško A_1 ir į dešinę iki taško B_1. Tada svyruojančios dalelės vidutinė padėtis nesutaps su r_0, o pasislinks į dešinę ir užims padėtį r_1. Aukštesnėje temperatūroje T_2 dalelės judės nuo taško A_2 iki taško B_2 ir jos vidutinė padėtis bus r_2. Taigi, didėjant temperatūrai, didėja nuotolis tarp kristalinės gardelės mazgų, t. y. vyksta kūno šiluminis plėtimasis.

Žinoma, kad kaitinamo nuo 0°C iki t°C temperatūros kietojo kūno pailgėjimas proporcingas pradiniam ilgiui ir temperatūrai

$$\Delta l = \alpha l_0 t.$$

Kūno tūrio pokytis taip pat proporcingas jo pradiniam tūriui ir temperatūrai:

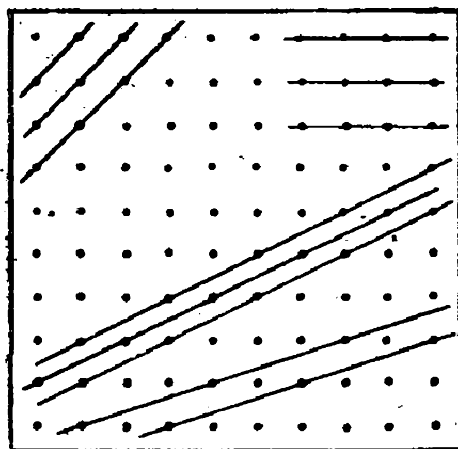
$$\Delta V = \beta V_0 t.$$

Šios formulės tinka tik polikristaliniams kūnams, o linijinio ir tūrinio plėtimosi koeficientai yra vidutiniai plėtimosi koeficientai. Galima įrodyti, kad kubinės simetrijos polikristalams ir monokristalams $\beta = 3\alpha$.

Monokristalai, skirtingai nuo polikristalų, yra anizotropiški šiluminio plėtimosi atžvilgiu. Įkaitintas kurio nors monokristalo rutulys virstų elipsoidu (38 pav.). Šiluminio plėtimosi koeficientai trijose kristalografijos ašyse vadinami ***kristalo pagrindiniais šiluminio plėtimosi koeficientais*** (α_1, α_2, α_3). Jų reikšmės kai kuriems kristalams pateiktos 1 lentelėje.

Kristalas	Temperatūra, °K	$\alpha_1, \times 10^{-6}$ deg^{-1}	$\alpha_2, \times 10^{-6}$ deg^{-1}	$\alpha_3, \times 10^{-6}$ deg^{-1}
Gipsas	313 60	1,6 −2	42 −2	29 55
Cinkas	150 300	8 13	8 13	65 64
Kalcitas	313	−5,6	−5,6	25

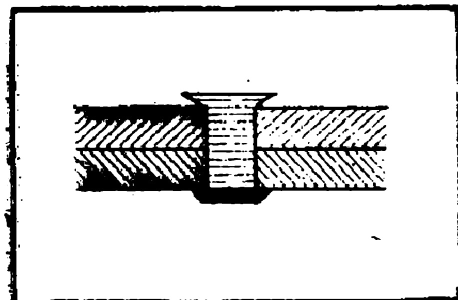
Iš lentelės matyti, kad monokristalų linijinio plėtimosi koeficientai skirtingose ašyse yra skirtingi ir kinta priklausomai nuo temperatūros. Gipsas turi net neigiamą α reikšmę. Tai reiškia, kad kaitinamas gipso monokristalas plečiasi pagal vieną ašį, o pagal kitas dvi — traukiasi.



39 pav.

Monokristalo tūrinio plėtimosi koeficientas yra lygus pagrindinių linijinio plėtimosi koeficientų sumai ($\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$).

Monokristalų savybių anizotropija ir iš dalies šiluminio plėtimosi anizotropija pasireiškia dėl to, kad kristalą sudarančios dalelės yra išsidėsčiusios taisyklingai. Taip išsidėsčiusių dalelių tankis įvairiomis kryptimis nevienodas. 39 paveiksle pavaizduota dalelių išsidėstymo kristale schema. Per gardelės mazgus išvedus plokštumas (paveiksle jas atitinka tiesės), matyti, kad šiose plokštumose dalelių išsidėstymo tankis nevienodas. Todėl sąveikos jėgos ir vidutinis nuotolis tarp dalelių monokristaluose įvairiomis kryptimis gali būti nevienodas; dėl to ir pasireiškia anizotropija.



40 pav.

Iš pateiktos lentelės matyti, kad kaitinami kieti kū-

nai plečiasi nežymiai. Tačiau net ir nedidelis plėtimasis kūnuose sukelia dideles įtampas. Į tokių įtampų atsiradimų galimybes visuomet reikia atsižvelgti technikoje. Pavyzdžiui, geležinkelio bėgiai klojami taip, kad tarp jų liktų maži tarpeliai, tiltų fermų galai dedami ant specialių ritinių, kad jie dėl šiluminio plėtimosi arba traukimosi galėtų slankioti.

Antra, šiluminio plėtimosi metu atsiradusios įtampos panaudojamos technikoje. Pavyzdžiui, norint tvirtai sujungti metalines konstrukcijas, dažnai taikomas karštas kniedijimas. Į sujungiamų dalių pragręžtą kiaurymę įdedama įkaitintas varžtas su specialia galvute. Iš kitos pusės varžtas užkniedijamas (40 pav.). Varžto strypas aušdamas traukiasi, ir galvutė bei suplota varžto dalis didele jėga suspaudžia jungiamąsias dalis. Elektros lempučių gamyboje, lydant laidus į stiklą, medžiagos parenkamos taip, kad jos turėtų panašius šiluminio plėtimosi koeficientus. Pavyzdžiui, stiklui ($\alpha=8\cdot10^{-6}$ deg^{-1}) iš grynų metalų geriausiai priimtina platina ($\alpha=9\cdot10^{-6}$ deg^{-1}). Tačiau jos aukšta kaina verčia ieškoti kito metalo, kuris jį pakeistų. Šiuo metu tam tikslui naudojamas lydinys platinidas, o kai kurioms stiklo rūšims — molibdenas.

Daugelio tikslių prietaisų darbui reikia, kad jų dalys nekeistų savo matmenų, keičiantis temperatūrai. Tuo atveju naudojami įvairūs kompensacijos metodai arba parenkami metalai, turintys labai mažą linijinio plėtimosi koeficientą. Kaip medžiaga prietaisų gamyboje plačiai naudojamas invaras — nikelio (36%) ir geležies (64%) lydinys; jo $\alpha=1{,}6\cdot10^{-1}$ deg^{-1}.

14 užduotis. 1. Ar vienodai keičiasi kaitinant ištisinio strypo ir vamzdžio matmenys, jeigu jų skersmuo ir ilgis vienodi?

2. Šaltas metalinis rutuliukas pralenda pro metalinį žiedą, o įkaitintas — nepralenda. Ar pralys rutuliukas pro kiaurymę, įkaitinus žiedą?

3. Įrodykite, kad $\beta=3\alpha$.

Paruoškite pranešimą tema: „Šiluminio plėtimosi reikšmė technikoje".

5. Paaiškinkite termorelės veikimą.

Literatūra. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. 1. М., «Наука», 1972, p. 430—431 (trečiam klausimui); p. 423, prat. 195—6 (penktam klausimui).

Маркович М. М., Уваров П. Я. Техника на уроках физики. М., Учпедгиз, 1960, p. 46—48 (ketvirtam klausimui).

Физика — юным. Составитель М. Н. Ергомышева-Алексеева. Ч. 1. М., «Просвещение», 1969, p. 161—163, 164 (ketvirtam klausimui).

Перышкин А. В. Курс физики. Изд. 17-ое. Ч. II. М., «Просвещение», 1970, p. 125—126 (ketvirtam skyriui).

17. KIETŲJŲ KŪNŲ ŠILUMINIS TALPUMAS

Kūno šiluminis talpumas rodo, kaip pasikeičia jo vidinė energija, temperatūrai pakitus vienu laipsniu[1].

$$C=\frac{\Delta E}{\Delta T},$$

čia ΔE — kūno vidinės energijos pokytis, jo temperatūrai pakitus ΔT.

Nemetalinių kristalinių kūnų vidinę energiją sudaro dalelių, esančių gardelės mazguose, svyravimo kinetinė energija ir jų sąveikos energija.

Panagrinėkime kietąjį kūną, turintį vienatomę gardelę, ir išaiškinkime, nuo ko priklauso jo šiluminis talpumas.

Tarkime, kad gardelės atomai nuo pusiausvyros padėties pasislinkę nedaug. Tada galime laikyti, kad jie svyruoja, veikiami kvazitamprumo jėgos $F=-kx$. Tada nutolusio atomo potencinė energija nustatoma pagal formulę $U=\frac{kx^2}{2}$, kinetinė — pagal formulę $E_k=\frac{mv_x^2}{2}$, o pilnutinė energija

$$E=U+E_k=\frac{kx^2}{2}+\frac{mv_x^2}{2}.$$

Svyruojant atomui, kinetinė energija nuolat virsta potencine, ir atvirkščiai. Tuomet per vieną svyravimo periodą potencinė energija du kartus turės maksimalią ir du kartus nulinę reikšmę. Tą patį galime pasakyti ir apie kinetinę energiją. Per periodą jos reikšmė du kartus bus lygi nuliui (kai potencinė energija didžiausia), ir du kartus bus lygi maksimumui (kai potencinė energija lygi nuliui). Todėl galime tvirtinti, kad toje temperatūroje kristalinės gardelės atomų svyravimo vidutinė potencinė energija yra lygi vidutinei kinetinei energijai:

$$\frac{\overline{mv_x^2}}{2}=\frac{\overline{kx^2}}{2}.$$

Fizikoje įrodyta (Bolcmano teorema), kad **šiluminio dalelių judėjimo energija (t. y. kinetinė energija) tolygiai pasiskirsto pagal jų laisvės laipsnių skaičių.** Kūno laisvės laipsniu vadinamas nepriklausomų kintamųjų, nusakančių jo padėtį, skaičius. Pavyzdžiui, trys nepriklausomos koordinatės *x, y, z* nusako materialaus taško padėtį erdvėje. Panagrinėsime vienatomę gardelę. Kiekvienas gardelės atomas atlieka nepriklausomus svyravimus

[1] Yra dvi šiluminio talpumo reikšmės: šiluminis talpumas esant pastoviam tūriui (C_V) ir šiluminis talpumas esant pastoviam slėgiui (C_p). Kietam kūnui šis skirtumas mažas, jis turi reikšmės tik aukštose temperatūrose. Kambario temperatūroje C_p didesnis už C_V maždaug 3—5%. Todėl, kalbėdami apie kietųjų kūnų šiluminį talpumą, neišskirsime C_V ir C_p, o naudosimės viena reikšme C.

trimis viena kitai statmenomis kryptimis. Vadinasi, vienatomėje kristalinėje gardelėje atomas turi tris laisvės laipsnius. Pagal Bolcmano teoremą, kiekvienam laisvės laipsniui tenka vienoda kinetinė energija

$$\overline{E}_k = \frac{1}{2} kT;$$

čia k — Bolcmano konstanta; T — absoliutinė temperatūra.

Kadangi atomo vidutinė kinetinė energija lygi jo vidutinei potencinei energijai, tai pilnutinė energija, tenkanti vienam laisvės laipsniui, sudaro

$$E = \overline{E}_k + \overline{U} = \frac{1}{2} kT + \frac{1}{2} kT = kT.$$

Kristalinės gardelės mazge svyruojančio atomo pilnutinė energija yra lygi pilnutinei energijai, tenkančiai vienam laisvės laipsniui, padaugintai iš laisvės laipsnių skaičiaus, t. y.

$$E = 3kT.$$

Žinodami šią formulę, galime užrašyti ir vieno medžiagos molio vidinės energijos formulę:

$$E_\mu = EN_0;$$

čia N_0— Avogadro konstanta, arba

$$E_\mu = 3kTN_0 = 3RT;$$

čia R — universali dujų konstanta.

Tuomet vienatomio kietojo kūno molinis šiluminis talpumas gali būti išreikštas taip:

$$C_\mu = \frac{\Delta E_\mu}{\Delta T} = \frac{E_\mu - 0}{T - 0} = \frac{E_\mu}{T} = \frac{3RT}{T} =$$
$$= 3R = 6 \text{ kcal/(kmol·deg)} \approx 25 \text{ J/(mol·deg)}.$$

Iš gautos lygybės matome, kad **visų vienatomių kristalinių kietųjų kūnų molinis šiluminis talpumas apytiksliai lygus 25 J (mol · deg).** Eksperimentais tai buvo nustatyta 1819 metais. Šis teiginys vadinamas Diulongo ir Pti dėsniu.

Sudėtingesnių dviatomių ir triatomių kristalinių gardelių molinis šiluminis talpumas atitinkamai lygus 50 J/(mol·deg) ir 75 J/(mol·deg).

Diulongo ir Pti dėsnis pagrįstas teorema apie tolygų energijos pagal laisvės laipsnius pasiskirstymą ir aprašo klasikinę šiluminio talpumo teoriją. Pagal jį kietųjų kūnų šiluminis talpumas nepriklauso nuo kūno medžiagos ir temperatūros. 2 lentelėje pateiktos kambario temperatūroje eksperimentiniu būdu nustatytos kai kurių medžiagų molinės šiluminio talpumo reikšmės.

Elementas	C,J/(mol · deg)	Elementas	C,J/(mol · deg)
Alavas	27,65	Kadmis	25,48
Aliuminis	25,61	Platina	26,23
Cinkas	25,44	Sidabras	25,57
Geležis	26,54	Varis	24,50
Jodas	26,42		

Iš lentelės matyti, kad eksperimentinės šiluminio talpumo reikšmės, rastos kambario temperatūroje, sutampa su teorinėmis.

Išvesdami Diulongo ir Pti formulę, laikėme, kad kieto kūno šiluminis talpumas priklauso tik nuo kristalinės gardelės šiluminio talpumo. Ši išvada teisinga tik nemetalų gardelėms. Metaluose yra didelis skaičius laisvųjų elektronų. Jų koncentracija yra 10^{23} cm^{-3}. Elektronai netvarkingai juda. Panašiai kaip dujų molekulės, jie sudaro vadinamąsias elektronines dujas. Todėl, kalbant apie metalų šiluminį talpumą, reikia atsižvelgti ne tik į gardelės šiluminį talpumą, bet ir šiluminį talpumą, kuris priklauso nuo laisvųjų elektronų judėjimo. Metaluose elektronai juda slenkamuoju judesiu, jie turi kinetinę energiją ir tris laisvės laipsnius, t. y. pagal kinetinę teoriją elektrono padėtį nusako trys nepriklausomos koordinatės. Iš tolygaus energijos pasiskirstymo pagal laisvės laipsnius teoremos išeina, kad kiekvieną laisvės laipsnį atitinka $1/2\ kT$ energija. Vieno elektrono pilnutinė energija apskaičiuojama pagal formulę: $E=\frac{3}{2}kT$. Elektronų energija medžiagos molyje $E_\mu=N_0\cdot\frac{3}{2}kT=\frac{3}{2}RT$.

Iš to matome, kad kietojo kūno elektroninis šiluminis talpumas $C_\mu=\frac{\Delta E_\mu}{\Delta T}=\frac{3}{2}R=3$ kcal/(kmol · deg) = 12,5 J/(mol · deg).

Taigi vienatomio metalo molinis šiluminis talpumas, įskaitant jo gardelės šiluminį talpumą ir laisvųjų elektronų šiluminį talpumą, turi būti lygus 9 kcal/(kmol · deg), arba 37,5 J/(mol · deg).

Tačiau bandymai nepatvirtina šios teorinės išvados. Iš 2 lentelės matyti, kad metalų šiluminis talpumas artimas 25 J/(mol · deg).

Vadinasi, **kambario temperatūroje elektronai praktiškai neturi reikšmės metalų šiluminiam talpumo didumui, t. y. pakilus temperatūrai vienu laipsniu, jų energija pakinta nežymiai.**

Sudėtingos šio reiškinio priežastys mūsų kursui nepriklauso, todėl jų nenagrinėsime. Tik pastebėsime, kad elektronas yra dalelė, kurios elgsena apibūdinama pagal kvantinės mechanikos dėsnius,— klasikinis dėsnis apie energijos tolygų pasiskirstymą jam netinka.

18. KIETŲJŲ KŪNŲ ŠILUMINIO TALPUMO PRIKLAUSOMYBĖ NUO TEMPERATŪROS

Pagal Diulongo ir Pti dėsnio formulę kietųjų kūnų šiluminis talpumas nepriklauso nuo temperatūros. Tačiau bandymai parodė, kad kietųjų kūnų talpumas, kintant temperatūrai, iš tikrųjų mažėja ir artėja prie nulio, temperatūrai artėjant prie absoliutinio nulio.

3 lentelėje pateiktos vario ir deimanto šiluminio talpumo reikšmės įvairiose temperatūrose.

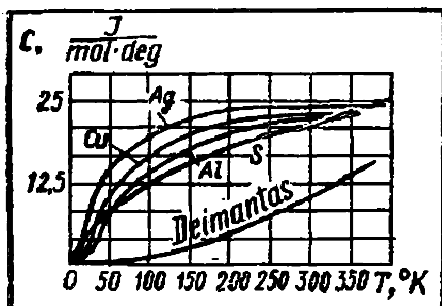
Kai kurių vienatomių kristalų molinio šiluminio talpumo priklausomybės nuo temperatūros grafikas pateiktas 41 paveiksle. Iš 3 lentelės ir 41 paveikslo matyti, kad šiluminio talpumo reikšmės artėja prie 25 J/(mol·deg) tik aukštoje temperatūroje, maždaug 200°C. Deimanto ši temperatūra aukštesnė net už 1000°C. Kambario temperatūroje jo šiluminis talpumas lygus 5,63 J/(mol·deg). Taip pat nuo Diulongo ir Pti dėsnio labai nukrypsta silicis ir boras. Kambario temperatūroje jų šiluminis talpumas atitinkamai yra 13,35 J/(mol·deg) ir 10,47 J/(mol·deg). Lentelėje ir grafike taip pat vaizdžiai matyti, kad šiluminis talpumas, krintant temperatūrai, mažėja ir šis mažėjimas tuo staigesnis, kuo žemesnė temperatūra.

Taigi atlikti bandymai įrodė, kad eksperimentiniai ir teoriniai duomenys, gauti pagal Diulongo ir Pti dėsnį, nesutampa. Klasikinė šiluminio talpumo teorija negali paaiškinti, kodėl kieto kūno šiluminis talpumas priklauso nuo temperatūros, ir nustatyti temperatūros srities, kurioje galima taikyti Diulongo ir Pti dėsnį. Čia į pagalbą ateina A. Einšteino sukurta šiluminio talpumo kvantinė teorija.

Pagal šią teoriją, kristalinės gardelės mazguose esantys atomai svyruoja nepriklausomai vienas nuo kito, vienodu dažniu, pavyzdžiui 10^{13} Hz. Svyruojantis atomas energiją spinduliuoja ne nuolat, o tam tikromis porcijomis. Porcijos (kvanto) energijos dydį nusako lygtis $\varepsilon = h\nu$; čia h — Planko konstanta ($h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s), ν — svyruojančio atomo dažnumas.

3 lentelė

Varis		Deimantas	
Temperatūra, °C	C,J/(mol · deg)	Temperatūra, °C	C,J/(mol · deg)
−259	0,1717	−230	0,00
−245	1,33	−183	0,13
−186	13,84	− 66	2,67
− 39	23,31	11	5,63
50	24,50	140	11,09
180	25,43	985	22,98



41 pav.

Aukštoje temperatūroje, kai dalelių šiluminio judėjimo energija, tenkanti vienam laisvės laipsniui, yra didelė, į energijos kvantinę prigimtį galima neatsižvelgti. Tuo atveju taikomas Diulongo ir Pti dėsnis. Žemoje temperatūroje, kurioje tinka nelygybė $h\nu \gg kT$, atomo svyravimui sužadinti šiluminio judėjimo energijos nepakanka; todėl kai kurie atomai „įšąla“, t. y. nesvyruoja, o dėl to šiluminis talpumas sumažėja. Temperatūra, kurioje ima mažėti šiluminis talpumas, gali būti nustatoma pagal šią sąygą: $h\nu = kT$; $T = \frac{h\nu}{k}$.

A. Einšteino šiluminio talpumo teoriją patikslino P. Debajus. A. Einšteinas buvo tos nuomonės, kad atomai kristalinės gardelės mazguose svyruoja nepriklausomai vienas nuo kito ir jų svyravimo dažnis vienodas. P. Debajus tvirtino, kad atomai kietame kūne susijungę vienas su kitu ir kad jie negali svyruoti tuo pačiu dažniu. Jų svyravimų dažnis yra nuo 10^4 Hz iki 10^{13} Hz.

Pagal P. Debajaus teoriją, temperatūrą, kurioje pradeda mažėti šiluminis talpumas, galima nustatyti iš šiluminės energijos, tenkančios vienam laisvės laipsniui, ir maksimalios atomo svyravimo energijos lygybės: $h\nu_{max} = kT$.

Ši temperatūra vadinama būdinga Debajaus temperatūra ir žymima raide Θ: $\Theta = \frac{h\nu_{max}}{k}$.

Būdinga temperatūra priklauso nuo įvairių kietų kūnų skirtingos sandaros. 4 lentelėje nurodytos kai kurių kūnų būdingos temperatūros.

4 lentelė

Medžiaga	T, °K	Medžiaga	T, °K
Deimantas	2000	Cinkas	308
Berilis	1160	Sidabras	225
Silicis	658	Auksas	165
Geležis	467	Švinas	94

P. Debajus taip pat tvirtino, kad artimoje absoliutiniam nuliui temperatūroje molinis šiluminis talpumas proporcingas temperatūros kubui. Tokia priklausomybė pasireiškia žemesnėje kaip $\frac{\theta}{50}$ temperatūroje. Ši priklausomybė vadinama Debajaus kubų dėsniu.

Taigi temperatūroje $T > \Theta$ teisingas Diulongo ir Pti dėsnis, $\Theta > T > \frac{\Theta}{50}$ šiluminis talpumas priklauso nuo temperatūros, tačiau šios priklausomybės kiekybinis pobūdis kol kas nėra nustatytas; temperatūroje $T < \frac{\Theta}{50}$ teisingas Debajaus kubų dėsnis.

15 užduotis. Paruoškite pranešimą apie A. Einšteino šiluminio talpumo teoriją.

Literatūra. Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, p. 354—356.
Детлаф А. А. и др. Курс физики. Изд. 4-е. Т. 1. М., «Высшая школа», 1973, p. 334—338.

19. KIETŲJŲ KŪNŲ ŠILUMINIS LAIDUMAS

Šiluminiu laidumu vadinamas vieno kūno šilumos perdavimas kitam arba vienos kūno dalies šilumos perdavimas kitai. Šis reiškinys galimas, kai kūnas prisiliečia prie kito kūno arba kai to paties kūno įvairių dalių temperatūra yra skirtinga. Dėl šiluminio laidumo visos kūno dalys įgyja vienodą temperatūrą. Tuomet tam tikras šilumos kiekis perduodamas iš labiau įkaitintos kūno dalies į mažiau įkaitintą.

Koks kietųjų kūnų šilumos perdavimo mechanizmas? Kad paaiškėtų šilumos perdavimo mechanizmas, reikia atsižvelgti ir į kristalinės gardelės savybes, ir į laisvųjų elektronų savybes. Metalų šiluminis laidumas pirmiausia yra elektroninio pobūdžio, t. y. energiją perneša laisvieji elektronai. Kristalinės gardelės šiluminis laidumas (gardelinis laidumas) kur kas mažesnis už elektroninį ir neturi ypatingos reikšmės. Gana aukštoje temperatūroje metalų gardelinis šiluminis laidumas sudaro tik 1—2% elektroninio šiluminio laidumo.

Išvesime lygtį kietųjų kūnų šiluminiam laidumui apibrėžti. Tarkime, dviejų kūno dalių temperatūros T_1 ir T_2, kai $T_1 > T_2$. Tuomet iš kūno dalies, kurios temperatūra T_1, bus perduodamas tam tikras šilumos kiekis į kūno dalį, kur temperatūra T_2. Šilumos kiekį, perduodamą per laiko vienetą ir ploto vienetą šiam plotui statmena kryptimi, pažymėsime ΔQ. Nuo ko jis priklauso? Aišku, kad kuo didesnis abiejų kūnų dalių temperatūrų skirtumas, tuo didesnis bus perduodamas iš vienos kūno dalies į kitą šilumos kiekis. Tačiau reikia atsižvelgti į tai, kad dvi kūno dalys, esant vienodam temperatūrų skirtumui, gali būti viena nuo kitos skirtingai nutolusios. Kuo mažesnis šis nuotolis, tuo didesnis šilumos kiekis per laiko vienetą ir ploto vienetą bus perduodamas. Taigi **per laiko vienetą ir per ploto vienetą statmena jam kryptimi per-**

duodamas šilumos kiekis yra tiesiog proporcingas temperatūros pokyčiui ilgio vienete, t. y.

$$\Delta Q = -k\frac{\Delta T}{\Delta x};$$

čia ΔT — kūno dalių temperatūros skirtumas; $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ — temperatūros pokytis ilgio vienete; k — šiluminio laidumo koeficientas.

Šiluminio laidumo koeficientas rodo, koks šilumos kiekis perduodamas per laiko vienetą ir per ploto vienetą, kai temperatūra kiekviename ilgio vienete pakinta 1°C. Pavyzdžiui, aliuminio šiluminio laidumo koeficientas $2{,}27\cdot10^2$ W/(m·deg). Galima sakyti, kad aliuminyje, kurio skersinio pjūvio plotas 1 m^2, per vieną sekundę perduodama $2{,}27\cdot10^2$ J energija, kai ilgio vienete temperatūra pakinta vienu laipsniu.

Minuso ženklas rodo, kad energija perduodama temperatūros mažėjimo kryptimi.

Kiekvienai medžiagai yra būdingas savas šiluminio laidumo koeficientas, todėl, suprantama, jo didumas priklauso nuo medžiagos vidinės sandaros. Anksčiau buvo sakyta, kad metalų šiluminis laidumas yra elektroninio pobūdžio, vadinasi, kuo daugiau elektronų dalyvauja, pernešant šilumą, tuo didesnis šiluminio laidumo koeficientas; kuo greičiau šie elektronai juda, tuo didesnis šilumos kiekis gali būti perduotas per laiko vienetą; kuo didesnį atstumą nesusidurdami judės elektronai, tuo didesnis bus šiluminio laidumo koeficientas. Jis taip pat priklauso nuo kietojo kūno specifinio šiluminio laidumo. Pasirodo, kad

$$k = \frac{1}{3}c\rho\overline{u\lambda};$$

čia c — specifinis šiluminis laidumas; ρ — metalo elektronų tankis; $\overline{u}$ — laisvųjų elektronų judėjimo vidutinis greitis metale; $\overline{\lambda}$ — laisvųjų elektronų vidutinis laisvojo kelio ilgis metale.

Nemetaluose, t. y. kristaliniuose, neturinčiuose laisvųjų elektronų kietuose kūnuose, šiluma perduodama, vykstant dalelių, sudarančių kristalinę gardelę, šiluminiam judėjimui.

Dėl šiluminio laidumo skirtingos prigimties dielektrikų šiluminio laidumo koeficiento reikšmės 10^2 kartų mažesnės, negu metalinių laidininkų. Pavyzdžiui, aliuminio $k=2{,}28\cdot10^2$ W/(m·deg), o kvarco — 2,60 W/(m·deg).

Dielektrikų monokristalams būdingos ir šiluminio plėtimosi anizotropijos savybės, ir šiluminio laidumo anizotropijos savybės.

5 lentelėje pateiktos kvarco kristalo šiluminio laidumo koeficiento reikšmės. Kvarco monokristalas yra šešiasienės prizmės, užsibaigiančios piramidėmis, formos (42 pav.).

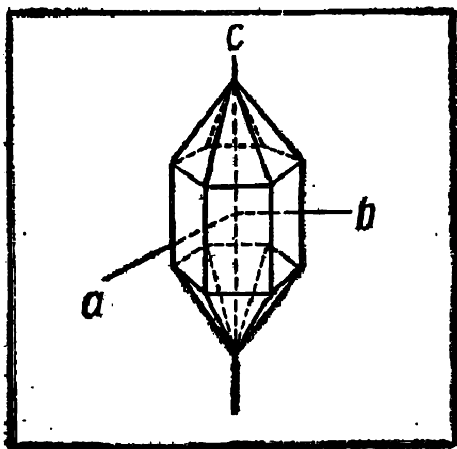
Iš lentelės matyti, kad kvarco kristalo šiluminio laidumo koeficientas du kartus didesnis kryptimi, lygiagrečia ašiai *c*, negu kryptimis *a* ir *b*, statmenomis tai ašiai. Mažėjant temperatūrai,

5 lentelė

Reikšmės k, W/(m · deg)	Temperatūra, °K			
	373	273	195	85
Lygiagrečiai ašiai c	3,20	4,90	7,04	17,64
Statmenai ašiai c	2,01	2,60	3,65	8,84

šiluminio laidumo koeficientas didėja.

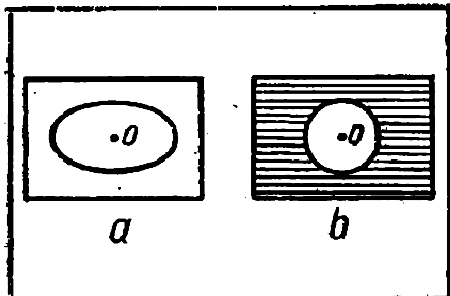
Šiluminio laidumo anizotropiją galima pademonstruoti bandymu. Stiklo plokštelę ir gipso plokštelę padengus plonu vaško arba parafino sluoksniu ir prigludus prie jų įkaitintą adatą, pamatysime, kad apie prisilietimo tašką parafinas ištirpsta, tačiau ant stiklo plokštelės ištirpęs plotas yra apskritas, o ant gipso plokštelės — elipsoidinis (43 pav.).



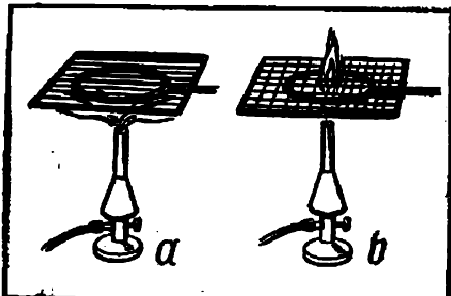
42 pav.

Kietųjų kūnų savybė skirtingai praleisti šilumą plačiai taikoma buityje ir technikoje. Vieniems tikslams naudojami metalai, gerai praleidžiantys šilumą, o kitiems — blogai praleidžiantys.

Pavyzdžiui, centrinio šildymo baterijos daromos metalinės, kad šilumą perduotų aplinkiniam orui, o pastato sienos — iš medžiagos, nepraleidžiančios iš pastato šilumos, pavyzdžiui iš plytų, medžio, akmenų, t. y. iš šilumos izoliatorių. Kad nebūtų be reikalo šiluma išspinduliuojama į aplinką, išoriniai vandentiekio vamzdžiai ir einantys per neapšildomas patalpas centrinio šildymo



43 pav.



44 pav.

vamzdžiai apdengiami šilumos izoliatoriais. Rūbai iš šilumai nelaidžios medžiagos (vilnos, audinio, odos ir t. t.) apsaugo mūsų kūną nuo šilumos nuostolių.

16 užduotis. 1. Ką reikia daryti, kad kaitinama su vandeniu stiklinė kolba nesprogtų?

2. Paruoškite pranešimą tema: „Metalų, skirtingai praleidžiančių šilumą, panaudojimas buityje ir technikoje".

3. Atlikite šiuos bandymus: ant dujinės plytelės padėkite metalinį tinklelį. Atidarykite čiaupą ir uždėkite dujas (44 pav., *a*) po tinkleliu ir virš tinklelio (44 pav., *b*). Liepsna degs tik vienoje tinklelio pusėje. Kur? Kodėl?

Literatūra. Клочков В. Н. Учебник физики. М., Медгиз, 1955, p. 223—225 (antram klausimui).

LITERATŪRA III SKYRIUI

Детлаф А. А. и др. Курс физики. Изд. 4-е. Т. 1. М., «Высшая школа», 1973, p. 324—338.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Изд. 2-е Т. 1. М., «Наука», 1973, p. 299—307, 459—466.

Бушманов Б. Н., Хромов Ю. А. Физика твердого тела. М., «Высшая школа», 1971, p. 67—84.

Блудов М. И. Беседы по физике. Ч. 1. М., «Просвещение», 1964, p. 96—99, 109—112.

Роджерс Э. Физика для любознательных. Т. 1. М., «Мир», 1969, p. 385—411; т. 11. М., «Мир», 1970, p. 536.

Вайнберг Д. В., Писаренко Г. С. Механические колебания и их роль в технике. Изд. 2-е, М., «Наука», 1965.

Стучков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, p. 346—356.

KIETŲJŲ KŪNŲ MECHANINĖS SAVYBĖS

Istoriškai taip susiklostė aplinkybės, kad bendros žinios apie metalų mechanines savybes, apie jų gamybą ir lydinius kaupėsi kur kas greičiau, negu mokslas apie kietųjų kūnų sandarą.

Liejininkystės meistrai, kariniai inžinieriai, laivų statytojai ir kalviai, nežinodami, kas atsitinka apdorojamiems metalams (pavyzdžiui, lydomiems arba grūdinamiems), sukūrė kietus, bet elastingus plienus, atsparų ketų ir minkštą lakštinę geležį. Remdamiesi tik savo stebėjimais ir patirtimi, meistrai ir inžinieriai pasiekė, kad staklių detalės, patrankų vamzdžiai, geležinkelio bėgiai ir laivų korpusai nesusidėvėtų anksčiau numatyto laiko. Pasirodo, tai pirmiausia priklauso nuo detalių formos ir matmenų, nuo metalų, iš kurių šios detalės pagamintos, savybių.

Vystant kietojo kūno sandaros teoriją, padaryta esminių pataisų moksle apie metalų mechanines savybes. Tai padėjo tolesniam ir efektingesniam šio mokslo vystymuisi.

Šiame skyriuje susipažinsite su kietųjų kūnų mechaninėmis savybėmis, sužinosite, kokią įtaką mokslo apie medžiagų [1] mechanines savybes vystymuisi turėjo kietojo kūno sandaros teorija.

20. DEFORMACIJOS IR MEDŽIAGŲ MECHANINĖS SAVYBĖS

Mechaniškai apdorojant medžiagas, keičiasi kūnų forma ir tūris, t. y. kūnai deformuojasi.

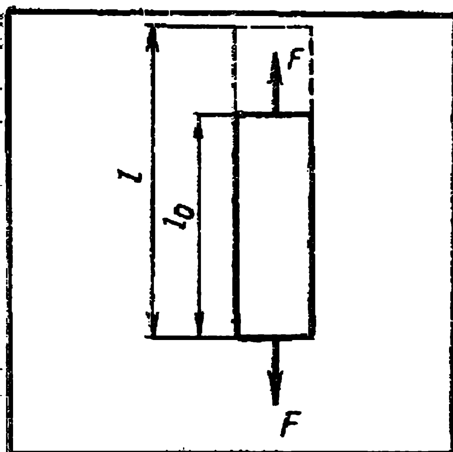
Deformacijos, išnykstančios nustojus veikti jėgai, vadinamos tampriosiomis deformacijomis. Medžiagos savybė, pasireiškianti tuo, kad iš jų pagamintas kūnas, išorinių jėgų veikiamas, deformuojasi, o nustojus veikti jėgoms, atgauna savo formą ir matmenis, vadinama tamprumu.

Deformacijos, liekančios kūne nustojus jį veikti kitiems kūnams, vadinamos liekamosiomis deformacijomis. Liekamoji deformacija apibūdina medžiagos savybę, vadinamą plastiškumu.

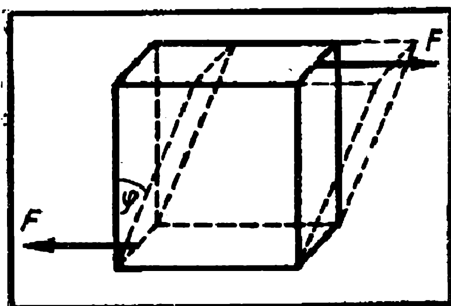
Tamprumas ir plastiškumas būdingas visiems kietiesiems kūnams. Tempdami plieninę spyruoklę, pastebėsime, kad mažai ištempta ji visiškai įgyja savo matmenis ir formą, o labai ištemptoje spyruoklėje atsiranda liekamosios deformacijos.

Antra, iš švino galima pagaminti spyruokliuojančią spiralę, kuri, silpnai veikiama, rodys tamprumo savybes.

[1] Medžiaga čia suprantama kaip kietas kristalinis kūnas.



45 pav.



46 pav.

Skiriamos šios kūnuose atsirandančios tampriųjų deformacijų rūšys: tempimas (arba gniuždymas), šlytis, sukimas, lenkimas.

Tempimas pasireiškia, eksploatuojant lynus, trosus, keliamųjų mechanizmų grandines, statybinių fermų strypus, traukinių vagonų sąvaržas ir kt.

Gniuždymą patiria namų pamatai, kolonos, sienos, statybinių fermų strypai ir kt.

Šlyties deformacija atsiranda, pavyzdžiui, pradinėje pjovimo tekinimo staklėmis operacijos stadijoje.

Sukimo deformaciją patiria mašinų velenai, ašys ir t. t.

Lenkimas atsiranda, kai įtvirtintos vienu galu spyruoklės (strypo) antrąjį galą veikia kitas kūnas.

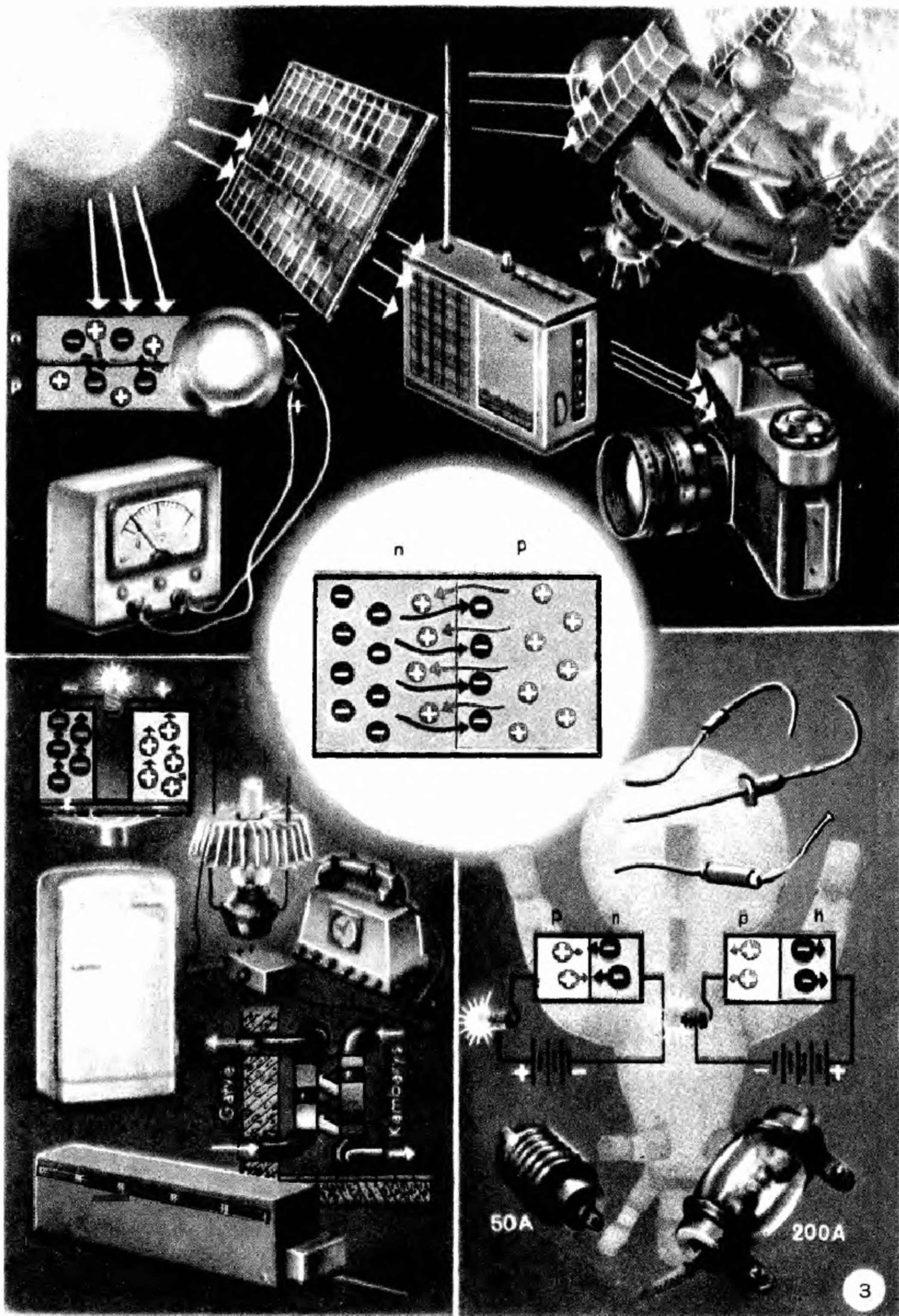
Kiekvieną deformaciją galima laikyti dviem paprasčiausiomis deformacijomis, pavyzdžiui, tempimo (arba gniuždymo) ir šlyties. Tempimo (gniuždymo) deformacijos atveju kūną veikiančios jėgos yra statmenos jo skersinio pjūvio plotui (45 pav.), o šlyties atveju — nukreiptos šio ploto liečiamąja (46 pav.).

→

p—n PERĖJIMO PRITAIKYMAS PRIETAISUOSE. **p ir n tipo puslaidininkių kontakte atsiranda sluoksnis (p—n perėjimas), turintis mažai pagrindinių srovės nešėjų. p—n perėjimas turi specifinį laidumą, jo pagrindu ir yra sudaryti puslaidininkių diodai. Savo savybėmis jie geresni už elektroninius-vakuuminius diodus (pav. apačioje dešinėje).**

Apšviečiant p—n tipo perėjimą, atsiranda fotoelektrovaros jėga. Šis reiškinys taikomas fotoelementams, kuriais šviesos energija paverčiama elektros energija. Dirbtiniuose žemės palydovuose ir kosminiuose laivuose, portatyviniuose radijo imtuvuose, fotoeksponometruose ir t. t. saulės baterijos yra elektros energijos šaltiniai (pav. viršuje).

Kaitinant p—n perėjimą, atsiranda termoelektrovaros jėga. Puslaidininkiniai termogeneratoriai pritaikomi kai kuriuose radijo imtuvuose kaip elektros energijos šaltiniai, kaip „šiluminiai siurbliai“ patalpų apšildymui, taip pat puslaidininkiniuose šaldytuvuose (pav. apačioje kairėje).


n
p
p
n
p
n
Kambarys
50A
200A
3

Dirbtinis palydovas

Automatinė tarpplanetinė stotis

П 201

П 410

П 408

Э Б К

R_a

Klausos akiniai

Kontrolinis laikrodis

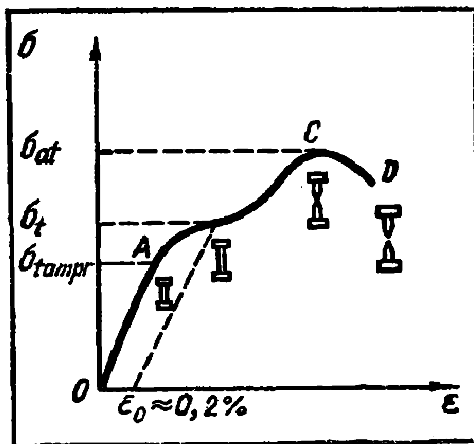
Elektroninė skaičiavimo mašina

4

Deformacijos, atsirandančios kietuose kūnuose, apibūdinamos santykiniu ilgio arba skersinio pjūvio ploto pakitimu. Pavyzdžiui, tempiant deformaciją apibūdina santykinis pailgėjimas (45 pav.):

$$\varepsilon=\frac{l-l_0}{l_0}=\frac{\Delta l}{l_0};$$

čia l_0 — pradinis ilgis, l — ilgis po deformacijos, o $l-l_0=\Delta l$ — absoliutinis pailgėjimas.



47 pav.

Santykinio pailgėjimo dydis dažnai vadinamas tiesiog deformacija.

Šlyties deformacija apibūdinama šlyties kampu φ, t. y. kampu, kuriuo pasikeitė pradinis statusis kampas (46 pav.). Santykine šlytimi (šlyties deformacija) vadinamas šlyties kampo tangentas ($\text{tg}\varphi$). Esant mažoms deformacijoms, $\text{tg}\varphi\approx\varphi$, taigi santykinė šlytis gali būti apibūdinama šlyties kampu, o ne to kampo tangentu.

17 užduotis. 1. Pateikite įvairių deformacijos rūšių pavyzdžių.

2. Panaudodami skirtingų metalų (vario, švino, plieno ir kt.) nedideles plokšteles arba laidus, spaustuvus arba reples, pademonstruokite atskiras deformacijos rūšis.

3. Paruoškite pranešimą tema: „Tampriųjų deformacijų rūšys".

Literatūra. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. 1. М., «Наука», 1972, p. 565—579.

21. MECHANINIŲ SAVYBIŲ CHARAKTERISTIKOS IR JŲ EKSPERIMENTINIS NUSTATYMAS

Įvairių medžiagų mechaninės savybės tiriamos, tų medžiagų pavyzdžius veikiant didelėmis jėgomis (apkrovomis). Ant išpjauto iš kokios nors medžiagos strypo (pavyzdžio) pakabinus platformą ir apkrovus ją tiek, kad strypas nutrūktų, galima nustatyti, kad strypą nutraukianti jėga tiesiog proporcinga jo skersinio pjūvio plotui.

←

TRANZISTORIŲ PRITAIKYMAS. Tranzistoriai, atlikdami elektroninių lempų funkcijas: stiprindami ir generuodami elektrinius virpesius, turi daug privalumų. Jie patvarūs, ekonomiškesni, lengvesni ir mažesni, nebijo vibracijos ir smūgių. Dėl to jie plačiai naudojami kosminėje aparatūroje, elektroninėse skaičiavimo mašinose, radijo technikos bei laikrodžių pramonėje, buityje.

Dydis, lygus strypą veikiančios jėgos ir jo skersinio pjūvio ploto santykiui, vadinamas įtampa:

$$\sigma=\frac{F}{S};$$

čia σ — įtampa; F — jėga, veikianti pavyzdį; S — jo skersinio pjūvio plotas.

Taigi įtampa yra apkrovimo charakteristika, nes nepriklauso nuo kūno matmenų.

Vienas mokslo apie medžiagų mechanines savybes uždavinių — nustatyti priklausomybę tarp įtampos, atsiradusios vienaip ar kitaip apkrovus pavyzdį, ir dėl to atsiradusios deformacijos. Daugeliu atvejų sąryšis tarp įtampos ir deformacijos yra sudėtingas. Eksperimentiškai ši priklausomybė nustatoma specialiomis, mechaniniams pavyzdžių bandymams skirtomis mašinomis. Diagrama, gauta tempiant cilindrinį pavyzdį tokia mašina, parodyta 47 paveiksle. Tempimo kreivę sudaro trys skirtingos dalys: pirmoji (OA) apibūdina tiesioginę apkrovos ir pailgėjimo priklausomybę, be to, apibūdina deformacijos grįžtamumą (pašalinus apkrovą, pavyzdžio ilgis atsistato), antroji (AC) — parodo tolesnį, tačiau ne tokį staigų, kaip pirmoje dalyje, apkrovos didėjimą; tuo atveju deformacija negrįžtama, tačiau tolygi per visą pavyzdžio ilgį; trečia dalis (CD) parodo, kad apkrova sumažėja, pavyzdyje atsiranda „kaklelis" (taškas C), ir pagaliau paskutinis — taškas D — parodo, kad pavyzdys yra nutrauktas [1].

Diagramoje tiesės atkarpa (dalis OA) atitinka pavyzdžio tamprumo deformaciją.

Kaip žinoma iš pagrindinio fizikos kurso, tampriosios deformacijos dėsningumą pirmasis išnagrinėjo Hukas. Fizikoje jis vadinamas Huko dėsniu: **tamprumo ribose deformacijos dydis proporcingas deformuojančiai jėgai.** Tai bendra dėsnio formuluotė. Ji tinka bet kokiai tampriosios deformacijos rūšiai.

Tempimo deformacijos atveju Huko dėsnis užrašomas taip: tamprumo ribose santykinis pailgėjimas (deformacija) tiesiog proporcingas įtampai, t. y.

$$\frac{l-l_0}{l_0}=\alpha\sigma, \text{ arba } \varepsilon=\alpha\sigma;$$

čia $\frac{l-l_0}{l_0}$ (ε) — santykinis pailgėjimas (deformacija); σ — įtampa (dydis, skaitine reikšme lygus jėgai, tenkančiai tempiamo pavyzdžio skersinio pjūvio ploto vienetui); α — linijinio tempimo koeficientas, skaitine reikšme lygus santykiniam pailgėjimui, kai įtampa lygi vienetui.

---

[1] Bandant įvairias medžiagas, tempimo kreivė gali būti ir sudėtingesnė.

Technikoje skaičiavimai atliekami ne pagal tempimo koeficientą, o pagal dydį $E=\frac{1}{\alpha}$, kuris vadinamas tamprumo moduliu, arba Jungo moduliu.

Taigi pavyzdžio tempimo diagramoje tiesi atkarpa *OA* (47 pav.) atitinka *tampriąją deformaciją* ir pagal Huko dėsnį apibrėžiama taip [1]:

$$\sigma=E\varepsilon.$$

Įtampos, mažesnės už diagramoje atitinkančias tašką *A*, praktiškai nesukelia liekamosios deformacijos, todėl gali būti nustatyta *tamprumo riba* ($\sigma_{tampr.}$), t. y. didžiausia įtampa, kuriai esant, pavyzdyje praktiškai nepastebima liekamųjų deformacijų [2].

Kreivės atkarpa *AC* tempiamojo pavyzdžio diagramoje atitinka perėjimą į *plastinių (liekamųjų) deformacijų sritį*. Liekamosios deformacijos dydis prieš suyrant, išreikštas pailgėjimu, šlyties kampu ir pan., yra medžiagos plastiškumo matas: kuo didesnė liekamoji deformacija, tuo plastiškesnė medžiaga. Jei prieš suyrant liekamosios deformacijos dydis mažas, tai medžiaga trapi.

Sąlyginė įtampa, kuriai esant liekamoji deformacija pasiekia dydį $\varepsilon_0\approx0{,}2\%$ pavyzdžio ilgio, vadinama takumo riba (σ_t).

Medžiagos atsparumą apibūdina *atsparumo riba* (σ_{at}) — įtampa, atitinkanti pavyzdžio atlaikomą didžiausią apkrovą — (momentas, kai plastinės medžiagos pavyzdyje atsiranda kaklelis).

Taigi medžiagų bandymui skirtomis specialiomis mašinomis eksperimentiškai galima gauti medžiagos mechaninių savybių visas pagrindines charakteristikas (E, $\sigma_{tampr.}$, σ_t, σ_{at}).

18 užduotis. 1. Fizikine prasme tamprumo modulis nusakomas kaip įtampa, kuriai esant, pavyzdžio ilgis padidėja dvigubai [3]. Įrodykite, kad tai teisinga, išsprendę šį uždavinį.

5 m ilgio ir 2 mm^2 skersinio pjūvio ploto laidas, veikiamas 400 N apkrova, pailgėja 5 mm. Kaip pakis laido ilgis, jei apkrova bus $\frac{1}{\alpha}$, t. y. lygi Jungo moduliui.

2. Medžiagoje, turinčioje didelę tamprumo modulio reikšmę, atsiranda mažos tamprumo deformacijos. Apskaičiuokite ir palyginkite tampriai deformuojamųjų vienodomis apkrovomis vienodų matmenų strypų (geležies ir vario) pailgėjimus. Ar gautieji rezultatai atitinka ankstyvesnius teiginius?

3. Paruoškite pranešimą tema: „Mašinos medžiagų bandymui“, arba „Rusų inžinieriaus A. Gagarino presas“.

Literatūra. Егоров А. Л. Рассказ о прочности. М., Учпедгиз, 1962, p. 19—24.

[1] Huko dėsnis šlyties tampriajai deformacijai gali būti užrašomas: $\sigma=G\operatorname{tg}\varphi$, o mažoms deformacijoms $\sigma=G\varphi$; čia σ — įtampa; G — šlyties modulis; $\operatorname{tg}\varphi$ (φ) — šlyties deformacija.

[2] Esant šiai įtampai, gali pasireikšti liekamoji deformacija, tačiau jos dydis negali būti didesnis kaip 0,001%, 0,003%, 0,005%. Tai reiškia, kad praktiškai liekamosios deformacijos nėra.

[3] Tačiau reikia prisiminti, kad daugumos kietųjų kūnų tamprioji deformacija nesiekia net 1%. Todėl fizikine prasme tamprumo modulis yra sąlyginis.

22. KIETOJO KŪNO MECHANINIŲ SAVYBIŲ CHARAKTERISTIKOS TEORINIS ĮVERTINIMAS IR JO PALYGINIMAS SU EKSPERIMENTINIAIS DUOMENIMIS

Žinodami idealaus kristalo sandarą ir jo paviršiaus energiją, galime teoriškai apskaičiuoti [1] mechaninių savybių pagrindines chrakteristikas.

Pavyzdžiui, norint apskaičiuoti tempiamo pavyzdžio tamprumo ribą, reikia rasti jėgą F, kuriai veikiant suyra medžiaga, t. y. pažeidžiamos sąveikos tarp plokštumų kristale jėgos.

Viena, tų jėgų darbą galima išreikšti taip:

$$A = F \cdot \Delta l; \tag{1}$$

čia Δl —nuotolis, kuriuo reikia viena nuo kitos atitolinti plokštumas, kad nugalėtume jų savitarpio traukos jėgas.

Antra, suardant visuomet susidaro naujas paviršius, t. y. padidėja paviršiaus energija [2]. Kaip žinoma (II skyr.), paviršiaus energiją galima nustatyti, padauginus paviršiaus įtempimo koeficientą iš paviršiaus ploto.

Taigi darbas, atliekamas, suardant pavyzdį, t. y. sudarant naujus paviršius

$$A = \alpha \cdot 2S. \tag{2}$$

Palyginę (1) ir (2) lygybes, gauname $2\alpha S = F\Delta l$; iš čia jėga, suardanti medžiagą,

$$F = \frac{2\alpha S}{\Delta l}.$$

Žinodami jėgą F, galime nustatyti atsparumo ribą, t. y. tą įtampą, kuri suardo (pažeidžia) kūno vientisumą.

$$\sigma_{at.} = \frac{F}{S}; \quad \sigma_{at.} = \frac{2\alpha S}{\Delta l S}; \quad \sigma_{at.} = \frac{2\alpha}{\Delta l}.$$

Aliuminio paviršiaus energija yra 1 J/m^2 eilės. Laikant Δl (atstumo tarp atomų padidėjimas) lygiu 10^{-10} m, galima rasti aliuminio atsparumo ribą:

$$\sigma_{at.} = \frac{2 \cdot 1}{10^{-10}} \text{ N/m}^2 = 2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2.$$

Eksperimentiškai nustatyta aliuminio atsparumo riba yra $(6-10) \cdot 10^7$ N/m^2.

---

[1] Pagal kietojo kūno sandaros teoriją, visi idealaus kristalo atomai išdėstyti tvarkingai — kristalinės gardelės mazguose, ir pasišalinti iš „savo“ mazgų negali. Apie savo kristalinės gardelės mazgus, atomai tik svyruoja.

[2] Kai suyra idealus kristalas, susidaro du nauji laisvieji paviršiai, kurių kiekvieną atitinka paviršiaus energija αS; čia α — paviršiaus įtempimo koeficientas.

Šiuo atveju teoriniai rezultatai 2—3 eile skiriasi nuo eksperimentinių.

Siekiant parodyti, kaip tokiu pat tikslumu randamas apibūdinantis medžiagos tamprumo savybes Jungo modulis, daroma prielaida, kad iki pat pavyzdžio suirimo deformacija lieka tampri, t. y. tinka Huko dėsnis: $\sigma = E\varepsilon$.

Jei aliuminiui apskaičiuota atsparumo riba atitinka absoliutinį pailgėjimą Δl 10^{-10} eilės, tai santykinė deformacija

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 10^{-10}} = \frac{1}{3};$$

čia $l = 3 \cdot 10^{-10}$ m — atomo „matmenys" (nuotolis tarp atomų) [1].

Taigi santykinė deformacija lygi 1/3, o teoriškai apskaičiuotas aliuminiui Jungo modulis:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}; \quad E = \frac{2 \cdot 10^{-10}}{\frac{1}{3}} \text{ N/m}^2 \approx 6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2.$$

Aliuminiui eksperimentiniu būdu nustatytas Jungo modulis yra $7 \cdot 10^{10}$ N/m^2 ir savo eile jis sutampa su anksčiau gautu teoriniu rezultatu.

Taigi, tik dalį mechaninių savybių galima daugiau ar mažiau tiksliai paaiškinti, remiantis idealiu kristalo modeliu. Todėl buvo sukurta hipotezė, kad teoriniai skaičiavimai nesutampa su eksperimentiniais rezultatais dėl kristalinės gardelės netobulumo. Vėliau atlikti eksperimentiniai bandymai šią hipotezę visiškai patvirtino.

Vadinasi, kai kurios medžiagų mechaninės savybės nesusijusios su struktūriniu netobulumu. Šios savybės vadinamos struktūriškai nejautriomis savybėmis. O tos mechaninės savybės, kurios glaudžiai susijusios su kristalų struktūriniu netobulumu, arba kaip sakoma, kristalų defektais, vadinamos struktūriškai jautriomis savybėmis.

Kokios gi kristalinės gardelės netobulumo rūšys? Kodėl jie atsiranda kristaluose? Kokią reikšmę jie turi medžiagų mechaninėms savybėms? Į visus šiuos klausimus gausite atsakymą tolesniuose paragrafuose.

19 užduotis. Kietam kūnui suardyti reikia tam tikros energijos. Kam sunaudojama ši energija? Kokia energijos rūšimi ji virsta? (Suyrant kinetinė energija daug mažesnė už visą sunaudotą energiją, todėl į ją galima neatsižvelgti.)

---

[1] Laikant, kad atomą atitinka kubo, kurio siena $a = \sqrt[3]{\frac{V_\mu}{N_A}}$ tūris; čia V_μ — molio tūris, lygus A (vieno molio masės) ir tankumo ϱ santykiui.

23. TAŠKINIAI DEFEKTAI IR JŲ ATSIRADIMO PRIEŽASTYS

Taškiniai defektai — tai erdvinės gardelės pažeidimas vienas nuo kito izoliuotuose taškuose. Taškiniai defektai yra vakansijos, t. y. gardelės mazgai, kuriuose nėra atomų (skylutės). Tokio defekto susidarymo schema parodyta 48 paveiksle, *a*. Taškiniu defektu gali būti įvestieji atomai, t. y. pašaliniai atomai, įsiterpę tarp atomų, esančių kristalinės gardelės mazguose (48 pav., *b*). Tai gali būti ir priemaišos (kitos rūšies atomai), gardelėje užimančios vietą (48 pav., *c*). Taškinių defektų matmenys apytiksliai lygūs atomo skersmeniui.

Kokios gi defektų atsiradimo priežastys? Vykstant atomų šiluminiam judėjimui ir jų sąveikai, gali atskirų atomų energija nukrypti nuo vidutinės reikšmės (įvykti fliuktuacijos), kuriai esant atomai laikosi kristalinės gardelės mazguose. Dideli nukrypimai nuo vidutinės reikšmės yra mažiau tikėtini, negu maži. Tačiau dideli nukrypimai, viršijantys vidutinę energijos reikšmę keliomis eilėmis, vis dėlto gali įvykti.

Defektai gali atsirasti, ir kristalams augant.

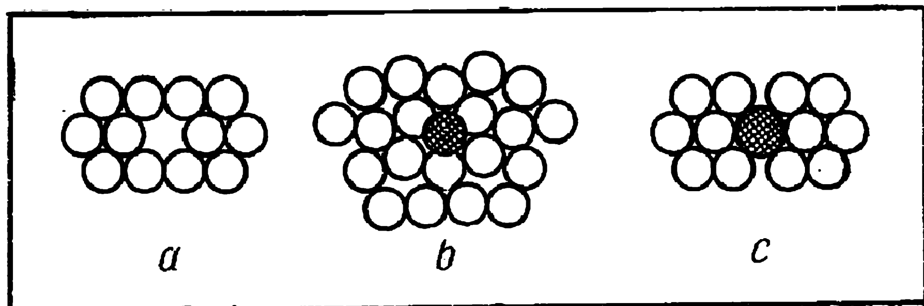
Taigi taškiniai defektai gali atsirasti, augant kristalams, ir dėl energijos fliuktuacijos.

Kad kristaluose esama taškinių defektų, eksperimentiškai patvirtina difuzijos reiškinys kietuosiuose kūnuose.

Iš tikrųjų kristaluose be defektų jokios difuzijos neturėtų būti. Jei atomai svyruoja apie kristalinės gardelės mazgus ir „nepalieka“ šios padėties, negali vieno kristalo atomai įsiskverbti į kitą kristalą.

Tačiau nustatyta, kad kietuose kūnuose difuzija vyksta, nors ir silpniau kaip skysčiuose ir dujose. Ypač įdomu, kad, kylant temperatūrai, šio proceso intensyvumas taip pat didėja.

Kaip aiškina difuzijos reiškinį kristaluose šiuolaikinė kietojo kūno sandaros teorija? Pagal šią teoriją, kristaluose difuzija vyksta dėl įterptinių atomų judėjimo, vakansijų judėjimo, arba dėl atomų pasikeitimo vietomis. Kad įterptiniai atomai „persikeltų“



48 pav.

į kitus tarpus tarp mazgų, o vakansijos į kitus mazgus, reikia, jog atomai, tiesiogiai supantys taškinį defektą, „prasiskirtų". Kylant temperatūrai, atomai „prasiskiria" dažniau ir kristaluose defektai slenka greičiau, todėl greičiau vyksta ir difuzija. Be to, kylant temperatūrai, didėja ir taškinių defektų skaičius. Nustatyta, kad $n=n_0\cdot 10^{-0{,}43\frac{W}{kT}}$; čia n — defektų skaičius tūrio vienete; n_0 — atominių mazgų skaičius tūrio vienete; W — defekto susidarymo energija; k — Bolcmano konstanta. Tačiau difuzijos intensyvumo padidėjimui didžiausią reikšmę turi ne defektų skaičiaus didėjimas, o jų judrumas.

20 užduotis. Žinomus taškinius defektus pavaizduokite schemomis.

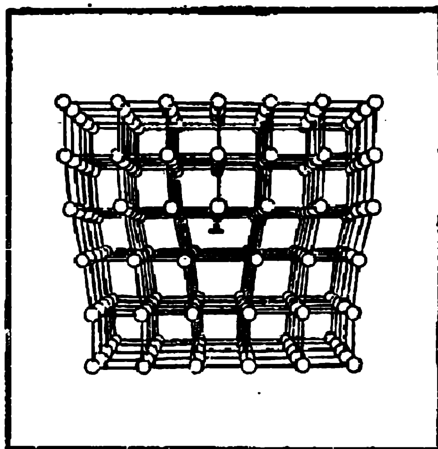
24. LINIJINIAI DEFEKTAI (DISLOKACIJOS) [1]

Yra dvi dislokacijos rūšys — kraštinė ir sraigtinė [2].

Kraštinė dislokacija parodyta 49 paveiksle. Kristalinės gardelės struktūra iškreipiama, į augančio kristalo tūrio dalį įsiterpiant pašalinei atominei „pusplokštumei". Iškreipimas, kaip matyti paveiksle, daugiausia palietė „įterptų" atomų „pusplokštumės" kraštą. Panašiais atvejais dislokacija vadinama linija, einanti išilgai įterptų atomų „pusplokštumės" krašto (49 paveiksle pažymėta ženklu ⊥).

Kristalinės gardelės struktūra iškreipta netoli dislokacijos linijos. Per kelis atomo skersmenis į šonus iškreipimas toks mažas, kad tose vietose kristalas beveik yra tobulos formos. Iškreipimas apie „įterptos pusplokštumės" kraštą atsiranda dėl to, kad artimiausieji atomai tarytum „bando" suderinti savo padėtį su staigiu „įterptos pusplokštumės" nutrūkimu.

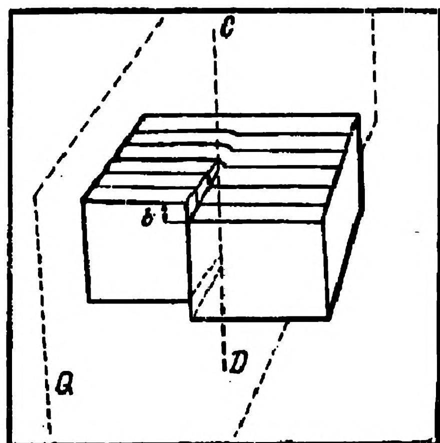
Bet koks įbrėžimas kristalo paviršiuje gali sukelti kraštinę dislokaciją. Iš tikrųjų įbrėžimą kristalo paviršiuje galima laikyti vienos atominės plokštumos trūkumu. Vykstant šiluminiam judėjimui, atomai iš kaimyninių sričių gali išeiti į paviršių, o dislokacija dėl to gali pasistumti gilyn.

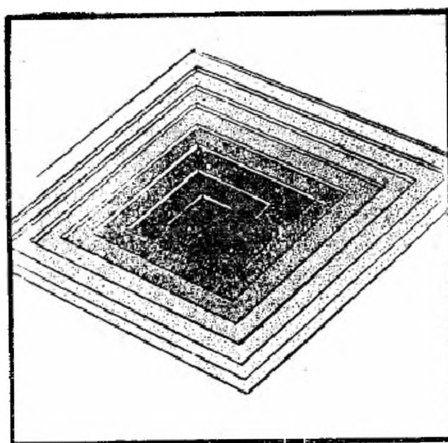


49 pav.

Sraigtinė dislokacija. Sraigtinės dislokacijos susidarymą galima įsivaizduoti taip. Minty-

[1] Dislokacija (pranc.) — poslinkis.
[2] Realiomis sąlygomis dislokacija paprastai būna šių dviejų rūšių derinys.



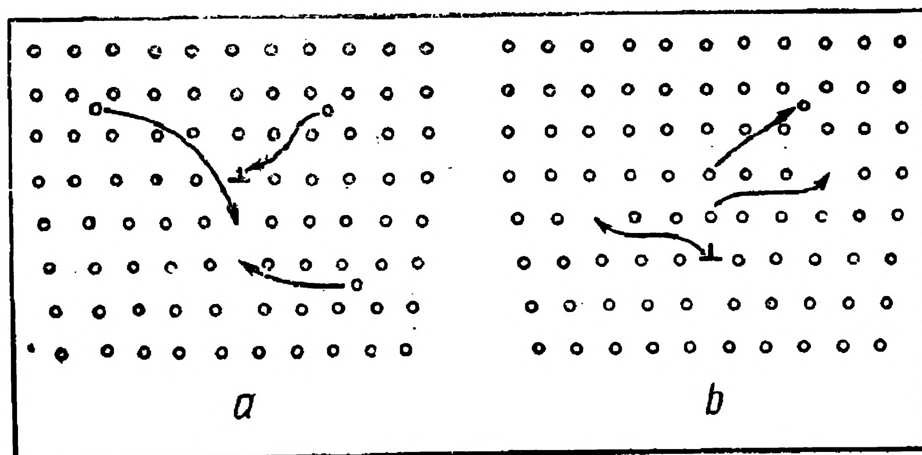


50 pav. 51 pav.

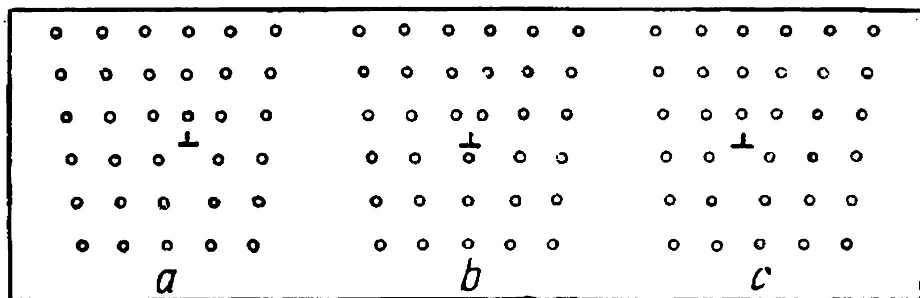
se įpjaukime kristalą (50 pav.) pagal plokštumą *Q* ir pastumkime vieną kristalo dalį kitos atžvilgiu šia plokštuma per vieną kristalo periodą lygiagrečiai įpjovos kraštui *CD*. Tada iškreipimo linija eis išilgai įpjovos krašto. Ši linija ir vadinama sraigtine dislokacija. Sraigtinės dislokacijos atveju pašalinės atomų eilės nėra. Erdvinės gardelės iškreipimas atsiranda dėl to, kad atominės eilės išlinksta ir keičia savo kaimynus.

Nustatyta, kad dažniausiai sraigtinės dislokacijos atsiranda (51 pav.), kristalams augant. Tačiau papildoma įtampa gali padidinti sraigtinių dislokacijų skaičių.

Dislokacijos, kaip ir taškiniai defektai, gali kristalinėje gardelėje keisti vietą. Tačiau dislokacijos judėjimas labai ribotas, nes dislokacija visada turi vykti nenutrūkstama linija. Galimi du dis-



52 pav.



53 pav.

lokacijos judėjimo būdai: pasislinkimas ir slydimas. Dislokacija pasislenka, papildomai atsiranda atomams pusplokštumės linijoje (52 pav., *a*) arba iš jos pasišalinant (52 pav., *b*),— tai vyksta difuzijos atveju. Dislokacijai slystant, įterptinė pusplokštumė, užėmusi kristalinėje gardelėje nustatytą vietą, susijungia su atomine plokštuma, esančia po slydimo plokštuma; kaimyninė atominė plokštuma dabar tampa įterptine pusplokštume (53 pav.). Tokį tolygų dislokacijos linijos slydimą sukelia kristalo paviršių veikiančios šlyties įtampos.

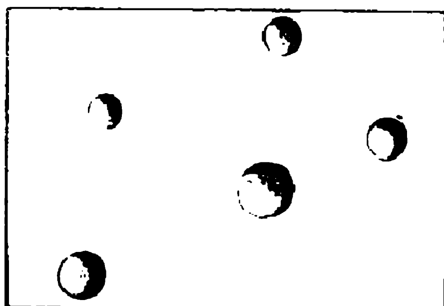
Stebėjimai parodė, kad realiame kristale dislokacijos vietas pakeičia (esant kitoms dislokacijoms) vienu atveju lengviau, kitu atveju sunkiau. Tai priklauso nuo iškreipimų, kuriuos kristalinėje gardelėje sąlygoja dislokacijos, pobūdžio.



54 pav.

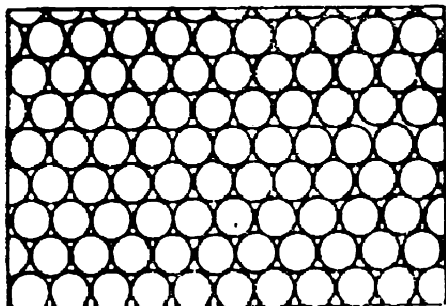
25. KRISTALŲ DEFEKTŲ EKSPERIMENTINIAI TYRINĖJIMO METODAI

Šiuo metu joniniu projektoriumi ir elektroniniu mikroskopu gaunamos kristalų struktūros su esančiais juose defektais fotonuotraukos (54 pav.). Nagrinėjant kristalų defektus, taip pat taikomas ėsdinimo metodas. Ant kristalo paviršiaus užpilamas cheminis ėsdintojas. Jis kur kas aktyviau veikia tas kristalo sritis, kuriose daugiau dislokacijų sukeltų iškreipimų. Ėsdinamo kristalo paviršiuje dislokacijų vietose atsiranda duobutės. Duobutės apžiūrimos pro paprastą optinį mikroskopą. Šiuo metodu nustatomas dislokacijų tankis (dislokacijų skaičius). 55 paveiksle pateikta gerai nupoliruoto germanio paviršiaus ėsdinimo fotonuotraukos schema.

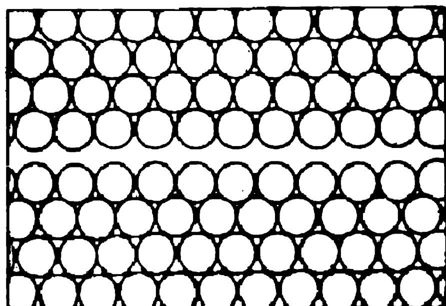


55 pav.

Taip pat įdomus procesų, turinčių ryšį su dislokacijų sąveikomis (vietos pakeitimu, grupavimusi ir pan.), modeliavimo metodas. Tam tikslui naudojamas kristalo pūsliukių modelis. Toks modelis gaunamas, pro muilo tirpalą pučiant nuo 1 iki 2 mm skersmens oro pūsliukes. Atitinkamai paruošiant tirpalą ir išpučiant pūsleles, galima gauti taisyklingos kristalo struktūros modelį (56 pav.). Atlikus šiame modelyje kai kuriuos sutrikdymus, modeliuojami defektai ir su jais susiję procesai (57 pav.).



56 pav.



57 pav.

26. DISLOKACIJŲ IR KITŲ DEFEKTŲ ĮTAKA MEDŽIAGŲ MECHANINĖMS SAVYBĖMS IR DEFORMAVIMO PROCESUI

Ankstesniuose paragrafuose susipažinome su kristalinės gardelės įvairiais defektais ir eksperimentiniais jų stebėjimo me-

todais. Kristalų defektų tyrimas turi didelę praktinę reikšmę, nes **kietųjų kūnų mechaninės savybės, jų plastiškumas, pasipriešinimas deformacijai susijusios su dislokacijomis ir kitais kristalų defektais.**

Medžiagų mechaninių savybių eksperimentiniai tyrimai rodo, kad dauguma grynų metalų yra minkšti ir plastiški. **Kristalų plastiškumą, palyginti mažą atsparumą (lyginant su teoriniu) nulemia dislokacijų atsiradimas kristalams augant.** Veikiant kristalą apkrovomis, keliant temperatūrą, dislokacijos ima judėti ir didėti jų tankis. Tankesnėse ir didesnės dislokacijų sąveikos vietose atsiranda pažeidimai (maži įtrūkimai). Jei irimas prasideda, vykstant gana didelėms plastinėms deformacijoms, tai tokie pažeidimai vadinami klampiaisiais (plastiškais). Jei irimas prasideda, neveikiant plastinėms deformacijoms, tai jis vadinamas trapiuoju. Pavyzdžiui, grupuojantis taškiniams defektams (vakansijoms), atsiranda mikroįtrūkimai. Didėjant medžiagų apkrovai, šie mikroįtrūkimai didėja. Atsiradę mikroįtrūkimai dažnai sukelia trapųjį irimą. Trapusis irimas įvyksta tada, kai plastinį takumą trukdo mikroįtrūkimai ir kiti defektai, atsirandantys, prieš prasidedant deformacijai arba jai vykstant. Dauguma medžiagų gali būti tokioje būsenoje, esant pakankamai žemai temperatūrai. Kai kurios medžiagos suyra trupėdamos ir kambario temperatūroje. Pavyzdžiui, germanis, silicis ir kitos medžiagos, būdamos plastinės temperatūrose, artimose lydymosi temperatūrai, pasidaro trapios, ataušintos iki kambario temperatūros. Kambario temperatūroje plastiški plienai pasidaro trapūs daug žemesnėje temperatūroje.

Praktikoje atkreipia dėmesį ir tokia irimų rūšis, kaip nuovargis. Nuovargis — tai medžiagos irimo rūšis, kai medžiagą ilgą laiką veikia periodiškai kintamos apkrovos įtempimai, kurie, esant statiniam apkrovimui, nesukeltų suirimo.

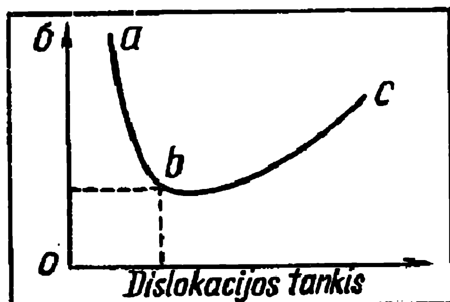
Šiuo metu gerai žinomos pagrindinės nuovargio ypatybės ir priemonės joms išvengti. Pavyzdžiui, paviršius yra zona, kur pirmiausia dėl nuovargio atsiranda pažeidimų. Aštrios įpjovos ir perėjimai paviršiuje, kiaurymės kniedėms, įdrėskimai, korozija labai susilpnina mašinų atsparumą nuovargiui. Gera paviršiaus kokybė ir apsauga nuo korozijos padidina atsparumą nuovargiui. Tačiau, nežiūrint tokių efektingų tyrimo priemonių, kaip elektroniniai mikroskopai, nuovargio mechanizme daug požymių lieka neaiškių. Nuovargis yra labai svarbi problema metalams ir lydiniams, nes šios medžiagos plačiai naudojamos periodiškai kintamų apkrovų veikiamose mašinose ir konstrukcijose.

Taigi kristalinių medžiagų stiprumui turi įtakos dislokacijos, jų judėjimas ir sąveika, taip pat ir kiti kristalų defektai.

27. MEDŽIAGŲ ATSPARUMO, DETALIŲ IR KONSTRUKCIJŲ PATVARUMO PADIDINIMAS

Dislokacijos ir jų judėjimas turi didžiulę įtaką medžiagų atsparumui: jos darosi plastiškesnės ir mažėja priešinimasis deformacijai. Tačiau dislokacijų tarpusavio sąveika, taip pat sąveika su kitos prigimties kliūtimis (kitais defektais ir pan.) sumažina dislokacijų judėjimą. Dėl to sumažėja medžiagų plastiškumas ir padidėja jų atsparumas (padidėja takumo riba). Grafiškai galima nubraižyti dislokacijų įtaką priešintis šlyčiai. Tokia kreivė parodyta 58 paveiksle. Čia abscisių ašyje atidėtas dislokacijų tankis, o ordinačių ašyje — atsparumas šlyčiai. Mažiausią atsparumą šlyčiai apibūdina tam tikra dislokacijų tankio kritinė vertė P_{kr}, kuri apytiksliai lygi 10^7-10^8 cm^{-2}. Nagrinėjant šią kreivę, matyti, kad galima padidinti atsparumą (priešinimąsi plastinei deformacijai), padidinus dislokacijų tankį (šaka *bc*). Šis atsparumo padidinimo metodas (plastiškumo sumažinimas) vadinamas sukietinimu. Tai plačiai taikoma praktikoje. Sukietinant dislokacijos veikia viena kitą ir jų tolimesnis judėjimas pasunkėja. Sukietinamas gaminys traukiamas pro velenus. Velenai gaminį veikia didžiuliu slėgiu ir jį išploja į ploną lakštą. Dėl to padidėja dislokacijų skaičius ir lakštai tampa atsparesni plastinei deformacijai. Sukietinimas apibūdinamas iš dalies tuo, kad tempimo diagramoje (žr. 47 pav.) padidėja plastinės deformacijos sritis, ir kreivė, esant didelei plastinei deformacijai, kyla labai staigiai. Tai ir rodo, kad padidėja atsparumas.

Analizuojant kreivę toliau (58 pav.), galima padaryti išvadą, kad atsparumą įmanoma padidinti ir kitu būdu, t. y. mažinant dislokacijų tankį (šaka *ab*). Tiesa, metalų apdirbimo metodai, kuriais siekiama gauti minimalų dislokacijų skaičių, dar nėra pakankamai tobuli, nors tokio efektyvaus atsparumo padidinimo galimybės eksperimentiškai įrodytos: tam tikslui paruošiant metalo pavyzdžius — plonus siūlus (2—10 mm storio), vadinamuosius dendritus, pavyko padidinti jų atsparumą (atsparumą šlyčiai), pavyzdžiui, gryno vario iki $7 \cdot 10^9$ N/m^2 (jo realus atsparumas šlyčiai 10^5 N/m^2).



58 pav.

Siekiant padidinti konstrukcijų atsparumą ir patvarumą, šiuo metu labai plačiai taikomas skirtingos sandaros medžiagų derinys — betonas ir geležis (tiksliau, plienas). Šio derinio rezultatas — gelžbetonis — vis plačiau taikomas statybinėje technikoje. Betonas gerai atlaiko gniuždymą, tačiau neatsparus tempimui. Jeigu iš jo galima gaminti atsparius pastatų

pamatus, tai betoninės sijos suyra, net veikiamos mažos apkrovos; jos pradeda irti sluoksniuose, kurie patiria tempimą, lenkiant. Plienas yra atsparus tempimui. Tačiau plienas, lyginant su betonu, yra brangi medžiaga ir vien ją statyboje naudoti neracionalu. Į stingstantį betoną įdėti lygūs plieniniai strypai apspaudžiami. Detalėse plienas ir betonas išdėstomi taip, kad eksploatacijos metu atsiradusios gniuždymo deformacijos veikia betoną, o tempimo — plieną.

Detalėse plieno ir betono kiekių santykis priklauso nuo detalės formos ir paskirties.

Specialistai-aviagamintojai yra tos nuomonės, kad lėktuvų gamyboje gelžbetonis (styginis betonas) galėtų būti labai kokybiška medžiaga. Aukšto atsparumo betonas turi būti stipriai įtemptas jame ištemptais labai plonais ir labai atspariais siūlais — stygomis; šių siūlų atsparumas padidinamas, mažinant dislokacijų tankį.

Kitas pavyzdys. Paprastame ketuje yra grafito plokštelių, kurios, veikiamos tempimo įtampų, susilpnina ketų. Todėl ketus, kaip konstrukcinė medžiaga, naudojama detalėms, kurias veikia gniuždymas. Tačiau ketaus atsparumą galima padidinti, grafito intarpus darant rutuliukų formos. To pasiekiama, į ketų įmaišant magnio ir kitų elementų. Technikoje plačiai naudojamos padidinto atsparumo medžiagos (metalai), kurios gaunamos, įmaišant specialių priedų (nikelio, mangano, volframo, chromo, molibdeno ir vanadžio)[1].

Priedų atomai sąveikauja su pagrindinio metalo dislokacijomis ir apsunkina jų judėjimą. Dislokacijų stabdymas metaluose padidina pasipriešinimą deformavimui, taigi padidina medžiagų atsparumą. Šiuolaikinių medžiagų atsparumas gniuždymui beveik pasiekė teorinį dydį.

Norint padidinti plieno atsparumą, naudojami ir kombinuoti jo apdirbimo būdai: labai įkaitintas strypas tempiamas kryptimi deformacijos, kuri pasireikš eksploatacijos metu. Po to, nepašalinant apkrovos, plienas staiga aušinamas (grūdinamas). Staiga aušinant, kaitinimo metu atsiradusių taškinių defektų lieka daugiau, negu žemoje temperatūroje. Tie defektai apsunkina dislokacijų judėjimą.

Taigi nuodugniau ištyrus kietojo kūno struktūrą ir atsižvelgiant į jų praktišką pritaikymą, pagerinus vienas ar kitas mechanines savybes, kokybiškai pakito medžiagos, padidėjo konstrukcijų ir mašinų atsparumas bei patvarumas.

21 užduotis. Paruoškite pranešimą tema: „Kaip gerino medžiagas mūsų protėviai ir kaip medžiagos gerinamos dabar“.

Literatūra. Егоров А. Л. Рассказ о прочности. М., Учпедгиз, 1962, p. 34—42.

Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол. М., «Мир», 1971.

[1] Šie priedai vadinami legatūrais, o gauti lydiniai (plienai) — legiruotaisiais.

LITERATŪRA IV SKYRIUI

Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М., «Мир», 1969, sk. 3, 6.

Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7. М., «Мир», 1966, sk. 30.

Холден А. Что такое ФТТ. Основы современной физики твердого тела. М., «Мир», 1971.

Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол. М., «Мир», 1971.

Даниленко В. М. Что такое твердое тело? Киев, Изд-во АН РСФСР, 1963.

Егоров А. Л. Рассказ о прочности. М., Учпедгиз, 1962.

V SKYRIUS

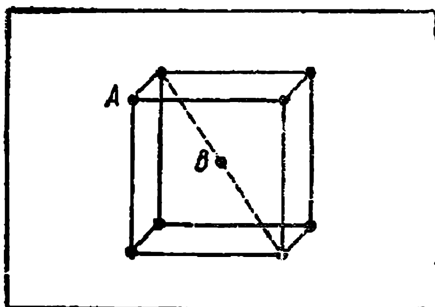
UŽDAVINIŲ SPRENDIMO PRAKTIKUMAS

28. UŽDAVINIAI II SKYRIUI (KRISTALŲ SANDARA)

UŽDAVINIŲ SPRENDIMO PAVYZDŽIAI

1 uždavinys. Kiek atomų tenka vienam erdvėje centruotos kubinės struktūros kristalo narveliui?

Sprendimas. Kiekvienas, esantis mazge atomas A, priklauso aštuoniems gretimiems narveliams (59 pav.). Vadinasi, vienam narveliui tenka 1/8 jo dalis. Tokių atomų A narvelio mazguose yra aštuoni. Taigi jų indėlis į vieną narvelį yra $1/8 \cdot 8 = 1$ atomas. Atomas B, esantis narvelio centre, priklauso tik šiam narveliui. Jo indėlis taip pat yra 1 atomas. Taigi vienam elementariam narveliui tenka $1+1=2$ atomai.



59 pav.

2 uždavinys. Gryno natrio atominė masė 23, o tankis $0{,}97 \cdot 10^3$ kg/m³. Apskaičiuokite jo gardelės periodą ir atomo skersmenį.

Sprendimas. Grynas natris yra ECK struktūros (žr. lentelę p. 130.) Vadinasi, kubiniam narveliui, kurio tūris a^3 (a — kubo briauna), tenka po 2 atomus (žr. 1 užd.), o kiekvienam atomui — $a^3/2$ narvelio tūrio.

Na molinė masė $M = 23{,}0 \cdot 10^{-3}$ kg/mol ir tankis $\rho = \dfrac{M}{N_A \cdot \dfrac{a^3}{2}}$, (čia N_A — Avogadro skaičius); iš čia

$$a = \sqrt[3]{\frac{2M}{N_A \rho}},$$

arba

$$a = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 23{,}0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{6{,}02 \cdot 10^{23}\, \text{mol}^{-1} \cdot 0{,}97 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{m^3}}} \approx 4{,}3 \cdot 10^{-10}\ \text{m}.$$

Tokios struktūros narvelyje artimiausi besiliečiantys atomai yra narvelio mazguose ir centre, t. y. pusė kubo įstrižainės turi būti lygi besiliečiančių atomų spindulių sumai (t. y. atomo skersmeniui d).

Iš to

$$d=\frac{a\sqrt{3}}{2}=\frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt[3]{\frac{2M}{N_A\rho}};\ d\approx3{,}7\cdot10^{-10}\ \text{m}.$$

UŽDAVINIAI SAVARANKIŠKAM SPRENDIMUI

2—1. a) Apskaičiuokite, kiek dalelių tenka vienam narveliui paprastoje ir plokštumoje centruotoje kubinėje gardelėje.

b) Raskite įvairių elementų kristalinių struktūrų lentelėje (p. 130) tas struktūras, kurias atitinka gautieji duomenys. Kaip paaiškinti tą faktą, kad lentelė sudaryta temperatūroms, artimoms kambario temperatūrai? Ar išsilaikys nurodytos joje elementų struktūros labai aukštoje ir žemoje temperatūroje?

2—2. Apskaičiuokite vario kubinio narvelio matmenis ir atomo skersmenį. Reikiamus duomenis imkite iš lentelės (p. 130) ir pasinaudokite 2 uždavinio (p. 63) ir 2—1 uždavinio sprendimu.

2—3. Aukso santykinė atominė masė 197,0. Apskaičiuokite aukso atomų skaičių viename cm^3, narvelio briaunos ilgį, aukso atomo spindulį.

2—4. Užpildykite šią lentelę:

Kubinio narvelio charakteristika

Gardelės charakteristika	Gardelės tipas		
	Paprasta	ECK	PCK
Vieno narvelio tūris			
Mazgų (dalelių) skaičius viename narvelyje			
Atstumas tarp artimiausių dalelių			
Artimiausių kaimynų (dalelių) skaičius			

2—5. Viena P. Skoto ekspedicijos Pietiniame poliuje žuvimo priežasčių buvo ta, kad suiro alavu lituoti indai, kuriuose buvo

laikomi degalai. Kaip paaiškinti alavo suirimą? Kaip šis reiškinys vadinamas?

2—6. Kambario temperatūroje geležis yra ECK struktūros (vadinamoji α geležis). Jos gardelės periodas $\alpha=2,86\cdot10^{-10}$ m. Įkaitinta virš 900°C geležis įgyja plokštumoje centruotą struktūrą, kurios gardelės periodas $\alpha=3,56\cdot10^{-10}$ m. Tuo atveju ji tampa tampresnė ir kietesnė. Kaip pakito geležies tankis?

2—7. Paprastos kubinės, erdvėje centruotos ir plokštumoje centruotos gardelės narvelyje atomai supakuoti kaip vienodi rutuliai. Kuri šių gardelių patogiausia glaudžiam supakavimui? Kokią tūrio dalį užima šie atomai? Kaip paaiškinti, kodėl nė vienas periodinės lentelės elementas nėra paprastos kubinės struktūros?

29. III SKYRIAUS UŽDAVINIAI

(KIETŲJŲ KŪNŲ ŠILUMINĖS SAVYBĖS)

UŽDAVINIŲ SPRENDIMO PAVYZDŽIAI

1 uždavinys. Koks pagal klasikinę šiluminio talpumo teoriją turi būti vario specifinis šiluminis talpumas?

Sprendimas. Pagal klasikinę šiluminio talpumo teoriją vario (arba bet kokio kito chemiškai gryno kristalinio kūno) molinis šiluminis talpumas $C_\mu=25$ J/(mol·deg). Specifinis šiluminis talpumas susijęs su moline išraiška $c=\frac{C_\mu}{M}$, čia M — elemento molinė masė. Iš čia gauname:

$$c=\frac{25\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{deg}}}{64\cdot10^{-3}\,\text{kg/mol}}\approx0,39\cdot10^{3}\ \text{J/(kg}\cdot\text{deg)}.$$

2 uždavinys. Išorinės kambario mūrinės sienos plotas 10 m², jos storis $d=1$m. Kiek reikia sudeginti anglių kiekvieną valandą, norint kambaryje palaikyti pastovią 20°C temperatūrą?

Oro temperatūra lauke —30°C, plytų šiluminio laidumo koeficientas $K=1,2$ W/(m·deg), krosnies n.k. $\eta=15\%$. Į kitų sienų, grindų, lubų šiluminį laidumą nekreipkite dėmesio.

Sprendimas. Šilumos kiekis, praeinąs plotu S per laiko tarpą t, $Q_1=-KSt\frac{\Delta T}{\Delta x}$; čia $\frac{\Delta T}{\Delta x}=\frac{-50^\circ\text{K}}{1\,\text{m}}$ — temperatūros gradientas, (Δx — šiuo atveju yra sienos storis).

Per tą patį laiko tarpą, sudegus anglims, kurių masė m, gautas šilumos kiekis $Q=qm$; čia q — anglies degimo šiluma ($q_{\text{angl}}=30\cdot10^{6}$ J/kg).

Atsižvelgdami į krosnies n. k., gauname $Q_1=\eta Q$ (pastovios temperatūros palaikymo sąlyga).

Iš čia

$$m_{\text{angl.}} = \frac{Q_1}{\eta q} = \frac{-KSt\frac{\Delta T}{d}}{0{,}15\cdot q},$$

arba

$$m_{\text{angl.}} = \frac{-1{,}2\ \frac{\text{J}}{\text{s}\cdot\text{m}\cdot\text{deg}}\cdot 10\,\text{m}^2\cdot\left(-\frac{50\ \text{deg}}{1\ \text{m}}\right)\cdot 3600\ \text{s}}{0{,}15\cdot 30\cdot 10^6\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \approx 0{,}5\ \text{kg}.$$

UŽDAVINIAI SAVARANKIŠKAM SPRENDIMUI

3—1. Kiek vidutiniškai viena nuo kitos nutolsta dalelės, esančios metalo kristalinės gardelės mazguose, temperatūrai pakilus 1 laipsniu.

3—2. Aliuminio strypas įkaitinamas 1 laipsniu. Kokia įtampa reikia veikti strypą, kad kaitinant jo ilgis nepakistų?

3—3. Tramvajaus bėgiai suvirinti — 10°C temperatūroje. Kokia įtampa juose atsiranda, pakilus temperatūrai iki 40°C? Plieno tamprumo modulis yra $2\cdot 10^{11}$ N/m^2, linijinio plėtimosi koeficientas $12\cdot 10^{-6}$ deg^{-1}.

3—4. Koks turi būti pagal klasikinę laidumo teoriją deimanto šiluminis talpumas (specifinis ir molinis)? Palyginkite gautą reikšmę su esančia lentelėje, t. y. gautą eksperimentiškai ($C = 0{,}46\cdot 10^3$ J/(kg·deg.). Kodėl jos nesutampa?

3—5. Lentelėje raskite aliuminio specifinį šiluminį talpumą 20°C temperatūroje. Ar šioje temperatūroje aliuminiui taikomas Diulongo ir Pti dėsnis?

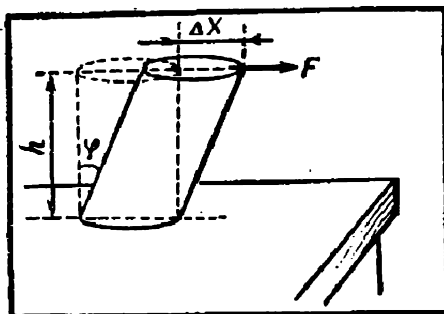
3—6. Įkaitinant nuo 30°C iki 60°C metalinį 0,3 kg masės daiktą, sunaudojama 24 900 J. Šis temperatūrų intervalas didesnis už nurodytą būdingą temperatūrą. Nustatykite, iš kokio metalo pagamintas daiktas.

3—7. Toliau pateiktos įvairių medžiagų šiluminio laidumo koeficientų reikšmės J/(m·deg·s).

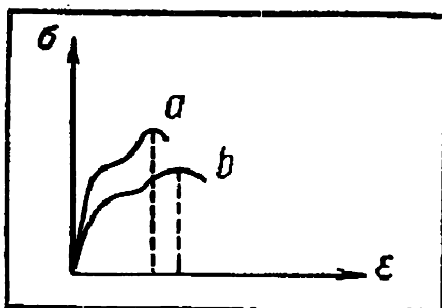
Vanduo	$6\cdot 10^{-2}$	Švinas	3,5
Ebonitas	$20\cdot 10^{-2}$	Sidabras	42
Kvarcas	$5\cdot 10^{-2}$	Dujos	$10^{-4}\div 10^{-5}$

Koks šiose aplinkose šilumos apykaitos mechanizmas? Kodėl taip labai skiriasi dujų, skysčių ir kietų kūnų šiluminis laidumas? Kodėl ebonito, kvarco ir vandens šiluminis laidumas beveik vienodas? Paaiškinkite, kodėl sidabro jis trimis eilėmis didesnis?

3—8. 0°C temperatūroje baseino vanduo apsitraukė 0,5 m storio ledo sluoksniu. Oro temperatūra —30°C. Kokį šilumos kiekį atiduos kiekvienas vandens dangos kvadratinis metras per 1 h? ($K_{\text{led.}} = 2{,}2$ J/(mol·deg·s). Kiek ledo susidarys šiame plote per parą?



60 pav.



61 pav.

30. IV SKYRIAUS UŽDAVINIAI (KIETŲJŲ KŪNŲ MECHANINĖS SAVYBĖS)

UŽDAVINIŲ SPRENDIMO PAVYZDŽIAI

1 uždavinys. Apskaičiuokite kambario temperatūroje kristalo vakansijų skaičių. Vakansijų susidarymo energiją laikykite $W=1$ eV.

S p r e n d i m a s. Santykinis vakansijų skaičius $\frac{n}{N}=10^{-0,43\frac{W}{kT}}$. Kambario temperatūra $T=300°$ K.

Tada $kT=1{,}38\cdot10^{-23}$ J/deg$\cdot300°=4{,}14\cdot10^{-21}$ J$=\frac{4{,}14\cdot10^{-21}}{1{,}6\cdot10^{-19}}=$ $=0{,}025$ eV.

Vadinasi, $\frac{n}{N}=10^{-,043\frac{1\,\text{eV}}{0{,}025\,\text{eV}}}=10^{-43\cdot40}\approx10^{-17}$.

2 uždavinys. Apatinis geležinio cilindro pagrindas, kurio skersmuo $d=20$ cm, įtvirtintas nejudamai. Cilindro aukštis $h=20$ cm. Viršutinį pagrindą (išilgai jo) veikia jėga $F=2\cdot10^4$ N. Raskite santykinę deformaciją φ (šlyties kampą) ir cilindro viršutinio pagrindo poslinkį Δx (60 pav.). Geležies šlyties modulis $G=7{,}8\cdot10^{10}$ N/m².

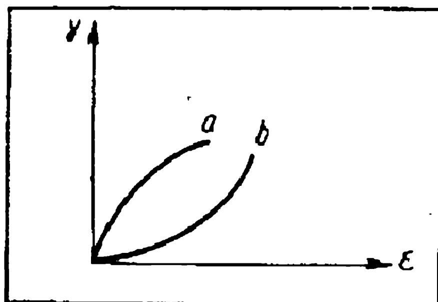
S p r e n d i m a s. Šlyties įtampa $\sigma=\frac{F}{\pi r^2}=\frac{4F}{\pi d^2}$. Pagal Huko dėsnį $\sigma=G\varphi$. Iš čia $\varphi_{(\text{rad})}=\frac{\sigma}{G}$; $\operatorname{tg}\varphi=\frac{\Delta x}{h}$; $\Delta x=h\operatorname{tg}\varphi$.

Mažiems kampams $\operatorname{tg}\varphi\approx\varphi$, todėl $\Delta x=h\varphi$.

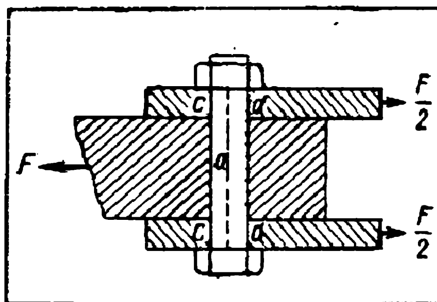
Įrašę skaitines reikšmes, gausime:

$$\varphi=\frac{4F}{\pi d^2G}=\frac{4\cdot2\cdot10^4\,\text{N}}{\pi\cdot4\cdot10^{-2}\,\text{m}^2\cdot7{,}8\cdot10^{10}\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}\approx8{,}2\cdot10^{-6}\ \text{rad};$$

$\Delta x=0{,}2\cdot8{,}2\cdot10^{-6}$ m$=1{,}6\cdot10^{-6}$ m$=0{,}0016$ mm.



62 pav.



63 pav.

UŽDAVINIAI SAVARANKIŠKAM SPRENDIMUI

4—1. 61 paveiksle parodyta dviejų vienodų matmenų, bet skirtingų metalų pavyzdžių tempimo diagramos. Kuo skiriasi šie metalai? Kuris jų geriau tinka šaltkalvių įrankių gamybai? Garo katilams?

4—2. Plieniniu lynu, kurio skersinio pjūvio plotas 300 mm^2, iš 400 m gilumo šachtos tolygiai keliamas 5 t masės krovinys. Raskite lyno įtampą ir jo atsparumo atsargą a) neatsižvelgdami į lyno svorį; b) atsižvelgdami į lyno svorį. Plieno tankis $8 \cdot 10^3$ kg/m^3, plieno atsparumo riba — $15 \cdot 10^8$ N/m^2.

4—3. Kokio ilgio vertikaliai pakabintas plieninis lynas (žr. 4—2 uždav.) nutruks dėl savo masės?

4—4. 62 paveiksle pateiktos dviejų skirtingų medžiagų (ketaus ir aliuminio) pavyzdžių gniuždymo diagramos. Kaip nustatyti, kokia medžiaga atitinka diagramą *a*, kokia *b*?

4—5. Montuojant metalines konstrukcijas, sujungimui plačiai naudojami metaliniai varžtai labai glaudžiai suveržia jungiamus elementus. Išorinės jėgos stengiasi tuos elementus pastumti, o varžtas neleidžia tai įvykti (63 pav.). Čia F — jėga, veikianti vidurinį elementą, o $\frac{F}{2}$ — jėgos, veikiančios du kraštinius elementus ir atsveriančios jėgą F; a — suveržiantis varžtas. Koks turi būti pasukamo krano pagrindinio varžto skersmuo, jei didžiausia tempimo jėga gali siekti $8 \cdot 10^4$ N, o leistina šlyties įtampa $\sigma = 8 \cdot 10^7$ N/m^2?

4—6. Du vienodų matmenų cilindrai pagaminti iš ketaus ir švino. Palyginkite tų cilindrų santykinės deformacijos φ didumą (šlyties kampą) ir viršutinio pagrindo poslinkį, jeigu viršutinį kiekvieno jų pagrindą (išilgai jo) veikia vienoda jėga, o apatiniai pagrindai įtvirtinti. Kurią iš šių medžiagų panaudotumėt varžtų gamybai? Kodėl?

4—7. Raskite santykinę deformaciją, kurią patirtų geležinis cilindras, nagrinėtas 2 uždavinyje (p. 67), jeigu jėga *F* būtų nukreipta vertikaliai žemyn.

4—8. Jūs gerai žinote bandymą su dviem švininiais cilindrais: gerai nuvalius galus ir juos vieną prie kito stipriai prispaudus, šie cilindrai gali išlaikyti gana didelį krūvį, nes juos laiko molekulių tarpusavio sąveikos jėgos. Apytiksliai apskaičiuokite didžiausią krūvį, kurį turi išlaikyti cilindrai, jeigu sąveika vyksta visame lietimosi plote. Dviejų molekulių sąveikos jėga apytiksliai yra $5 \cdot 10^{-11}$ N, šios jėgos veikia mažu atstumu, jos greitai mažėja, didėjant nuotoliui, todėl sąveika vyksta tik vieno sluoksnio ribose. Molekulės skersmuo $3 \cdot 10^{-8}$ cm. Cilindro skersinio pjūvio plotą apskaičiuokite patys.

Bandymu patikrinkite, ar gautas rezultatas teisingas.

Kodėl nesutampa teoriniai rezultatai su praktiškai gautais?

4—9. Kad aliuminyje susidarytų vakansijos, reikia 0,75 eV energijos (t. y. $12 \cdot 10^{-20}$ J). Raskite kambario temperatūroje ir aliuminio lydymosi temperatūroje sąlyginį vakansijų skaičių aliuminyje. Palyginkite gautus rezultatus ir padarykite išvadas.

4—10. Dabar apskaičiuokite, koks būtų kambario temperatūroje sąlyginis vakansijų skaičius, jeigu išplėšti dalelę iš mazgo būtų taip sunku, kaip ją pašalinti iš kristalo (žinoma, kad kristalui suardyti reikia apie $8 \cdot 10^{-19}$ J/dal. energijos).

VI SKYRIUS

MOLEKULINĖS FIZIKOS FIZIKINIS PRAKTIKUMAS

31. 1 DARBAS. KRISTALIZACIJOS PROCESO STEBĖJIMAS

I. KRISTALIZACIJOS PROCESO STEBĖJIMAS PRO MIKROSKOPĄ

Išorinio vaizdo taisyklingumas yra būdinga kristalų savybė. Tolygiai svarbi kristalų savybė yra ir jų augimo anizotropija. Augdami į visas puses vienodai, kristalai būtų rutulio formos.

Šias kristalų ypatybes galima pastebėti mikroprojektuojant. Šis darbas apima kristalų augimo anizotropijos ir jų formos taisyklingumo stebėjimą.

Priemonės. Projektorius su kino projekcine lempa (300 W, 127 V) arba lankinė lempa (10—12 A), mokyklinis biologinis mikroskopas su objektyvu 8× ir okuliaru 10×, mikroskopui padėti stalelis, šilumą sulaikantis filtras iš C-3—C-14 markės 6—8 mm storio stiklo, stalinis ekranas, ant kurio būtų centimetrinis mastelinis tinklelis, kolba su vario sulfato prisotintu tirpalu ir kolba su valgomosios druskos prisotintu tirpalu, stiklinė lazdelė, kuria tirpalas užlašinamas ant objektinio stiklo, abipus išgaubtas lęšis su diafragma (lęšio skersmuo $D=$ $=80$ mm, židinio nuotolis $F=400$ mm).

Darbo eiga

1. Surinkite įrenginį ant projekcinio suolo. Tuo tikslu į šviestuvo korpusą įstatykite kino projekcinę lempą. Kondensoriumi gaukite susiglaudžiantį spindulių pluoštą. Ant suolo, prieš kondensorių pritvirtinkite šilumą sulaikantį filtrą, už jo mikroskopą. Kad į objektyvą patektų siauresnis šviesos pluoštas, prieš mikroskopą padėkite lęšį ir pertvarą. Mikroskopo vamzdį pastatykite horizontaliai taip, kad jo optinė ašis sutaptų su projekcinio aparato kondensoriaus optine ašimi.

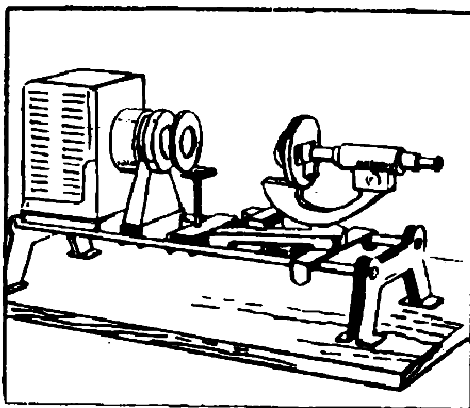
Nuimkite mikroskopo veidrodį arba jį pasukite į šoną, kad šviesos pluoštas tiesiog kristų į objektinio stalelio angą.

Kad neįkaistų objektyvas ir preparatas, reikia prieš mikroskopą pastatyti šilumą sulaikantį filtrą iš specialaus stiklo su vandeniu, kurio storis ne mažesnis kaip 5 mm.

Įrenginio schema parodyta 64 paveiksle.

2. Įrenginį sucentruokite: pasiekite, kad šviesos šaltinis ir visų lęšių optiniai centrai būtų vienoje tiesėje, nustatykite ryškumą. Tuo tikslu tarp dviejų švarių stiklų suspauskite plauką ir padėkite spindulių pluošte ant mikroskopo objektinio stalelio. Ekrane turite gauti ryškų plauko vaizdą.

3. Stikline lazdele paimkite iš kolbos lašą valgomosios druskos arba vario sulfato prisotinto tirpalo ir užlašinkite jį ant objektinio stiklo. Lašą išsklaidykite labai plonu sluoksniu. Dėl to lazdelę truputį pavilgykite tirpale ir šonu perbraukite per stiklą, o po to stiklą sukrėskite. Tirpalą reikia pagaminti iš anksto ir jį laikyti užkimštoje kolboje.



64 pav.

4. Objektinį stiklą su preparatu padėkite šviesos pluošte ant mikroskopo stalelio ir, slankiodami objektyvą išilgai optinės ašies, gaukite ekrane ryškų vaizdą.

Pakaitintas preparato lašas greitai išgaruos ir iš tirpalo išsiskirs kristalai.

5. Stebėjimui išsirinkite vieną kristalą, kad jo kubo siena (valgomosios druskos kristalo) arba lygiagretainio siena (vario sulfato kristalo) būtų lygiagreti ekrano tinklelio linijai, ir pagal savo laikrodžio sekundinę rodyklę pažymėkite laiką.

6. Sulaukite momento, kai stebimo valgomosios druskos kristalo sienos projekcija pasislinks 1 cm.

7. Tą patį atlikite, stebėdami natrio sulfato kristalo augimą.

8. Padarykite išvadas dėl skirtingų medžiagų kristalų augimo greičio vienodomis sąlygomis.

9. Nupieškite ekrane gauto valgomosios druskos ir vario sulfato kristalų vaizdą stebėjimo pradžioje ir pabaigoje, padarykite išvadas.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

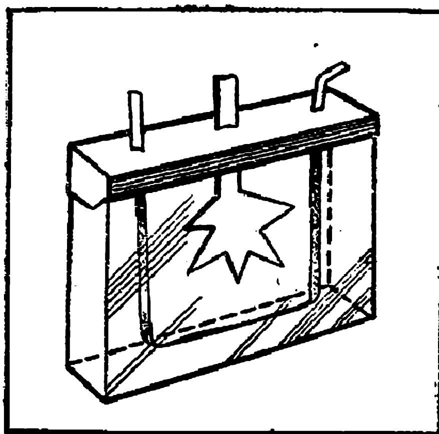
1. Ar kristalizacija skiriasi nuo kristalų augimo?
2. Ką galima pasakyti apie kristalų augimą skirtingomis kryptimis?
3. Ar skiriasi skirtingų medžiagų kristalų forma? (Atsakymą pagrįskite savo stebėjimo rezultatais.)

II. KRISTALIZACIJOS PROCESO STEBĖJIMAS, LEIDŽIANT ELEKTROS SROVĘ PRO ŠVINO ACETATO TIRPALĄ

Priemonės. Plokščias su lygiagrečiais šonais indas, švininiai elektrodai, švino acetato (švino cukraus) tirpalas, projektorius, 4—6 V srovės šaltinis, laidai, jungiklis.

Darbo eiga

1. Į plokščią, skirtą projektavimui indą įpilkite silpno švino acetato $(CH_3COO)_2\,Pb\cdot 3H_2O$ tirpalo.



65 pav.

2. Į indą įdėkite specialios formos švino elektrodus, pavyzdžiui, vieną lanko formos, kitą eglutės formos (juos galima išpjauti iš švino plokštelių) ir įtvirtinkite bendrame izoliuojančiame dangtelyje (65 pav.).

3. Nuosekliai sujunkite elektros grandinę (elektrodus, reostatą, jungiklį ir srovės šaltinį).

4. Indą pastatykite tarp kondensoriaus bei objektyvo ir įrenginį nukreipkite į ekraną.

5. Sujunkite grandinę ir stebėkite švino kristalizacijos procesą ant katodo.

6. Kad tirpalas, išsiskiriant druskoms, nesusidrumstų, įlašinkite kelis lašus acto rūgšties.

7. Nupieškite vaizdą, gautą ekrane [1].

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kokį kristalų tipą stebite šiame bandyme?
2. Kokiomis sąlygomis susidaro dendritai?

32. 2 DARBAS. TEMPIMO DEFORMACIJOS NAGRINĖJIMAS

Darbo tikslas: ištirti plieno ir vario tamprumo savybes. Iš pradžių veidrodiniu masteliu nustatomi laidų iš įvairių medžiagų Jungo moduliai. Veidrodiniu masteliu galima nustatyti ne viso laido, o tik jo dalies (tarp veidrodinių mastelių) pailgėjimą. Taip išvengiama paklaidos, atsirandančios dėl laido užvyniojimo tvirtinimo vietose, kai norima kruopščiai jį sujungti.

Įtampa $\sigma = \frac{F}{S}$, pagal Huko dėsnį, tampriai deformuojamame kūne proporcinga santykinei deformacijai $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$, t. y. $\sigma = E\varepsilon$; čia E — tamprumo modulis.

Vienpusio tempimo arba gniuždymo atveju deformacijos tamprumo modulis vadinamas Jungo moduliu. Tuomet dydis $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$

[1] Šiame bandyme katodas yra medžio lapo formos ir vadinamas „Saturno medžiu".

vadinamas santykiniu pailgėjimu. Tuo atveju Huko dėsnį galima užrašyti taip:

$$E = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{Fl}{S\Delta l};$$

Čia S — pavyzdžio skersinio pjūvio plotas.

Tomis pačiomis priemonėmis analogiškai nustatoma varinio laido atsparumo riba.

I. JUNGO MODULIO NUSTATYMAS

Priemonės. Skirtingo skersinio pjūvio ploto 0,2÷0,5 mm skersmens ir 3 m ilgio geležiniai ir variniai laidai, veržtuvas tvirtinimui prie stalo krašto, veržtuvas su skridiniais, metrinė liniuotė su milimetrinėmis padalomis, trys masteliniai veidrodžiai su stovais, mikrometras.

Darbo eiga

1. Pagal 66 paveiksle pateiktą schemą surinkite įrenginį.

2. Paimkite vieną be perlenkimų laidą. Jo vieną galą gerai pritvirtinkite prie veržtuvo A kabliuko, o kitą permeskite per skridinį B.

3. Kad išlygintumėte laidą, prie jo laisvojo galo pritvirtinkite 0,5 kg masės krovinį.

4. Ant laido užriškite tris siūlo arba laido mazgus ir už jų padėkite tris veidrodinius mastelius — plokščius veidrodžius su milimetrinėmis padalomis.

5. Mikrometru keliose vietose išmatuokite laido skersmenį ir pasižymėkite vidutinę jo reikšmę. Apskaičiuokite skersinio pjūvio plotą.

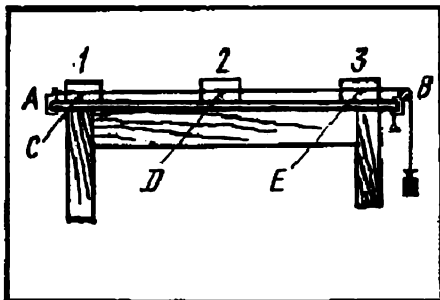
6. Išmatuokite laido ilgį tarp taškų C ir E ir tarp C ir D.

7. Veidrodiniuose masteliuose pažymėkite taškų C, D ir E vietas.

8. Padidinkite krovinį 5 N. Ar atžyma C liko toje pačioje vietoje? Kiek pasislinko atžymos D ir E?

9. Nuimkite krovinį. Ar atžymos D ir E grįžo į pirmykštes padėtis?

10. Padidinkite krovinį 10 N, 15 N ir kiekvieną kartą pažymėkite viso laido, pusės laido ir trečdalio laido pailgėjimą.



66 pav.

11. Pakartokite bandymą su tos pačios medžiagos, tačiau kitokio skersinio pjūvio ploto laidu, taip pat ir su kitos medžiagos laidais.

12. Iš formulės $E = \frac{Fl}{S\Delta l}$ raskite Jungo modulį.

13. Sudarykite lentelę.

Medžiaga	Skersmuo (d), mm	Skersinio pjūvio plotas (S), mm^2	Laido pradinis ilgis (l), mm	Apkrova (F), N	Absoliutinis pailgėjimas (Δl), mm	Tamprumo modulis (E)
Varis						
Varis						
Geležis						

14. Apskaičiuokite nustatant Jungo modulį padarytą paklaidą.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kaip nuo apkrovos priklauso laido absoliutinis pailgėjimas?
2. Kaip keičiasi laido absoliutinis pailgėjimas, kintant jo pradiniam ilgiui?
3. Ar pailgėjimo pakitimas priklauso nuo laido medžiagos, kai jo ilgis ir apkrova lieka tie patys?
4. Ar priklauso tamprumo modulis nuo paimto bandymui pavyzdžio matmenų?

II. ATSPARUMO RIBOS NUSTATYMAS

1. Lygią, nesulankstytą vielą pritvirtinkite prie veržtuvo *A* kablio (66 pav.).
2. Išmatuokite mikrometru vielos skersmenį ir apskaičiuokite skerspjūvio plotą.
3. Laisvą vielos galą permeskite per skridinį ir pamažu tempkite.
4. Kiekvieną kartą lentelėje užrašykite apkrovą ir pailgėjimą.

Bandymo Nr.	Skersmuo (d), mm	Skersinio pjūvio plotas (S), mm^2	Laido pradinis ilgis (l), mm	Apkrova (F), N	Absoliutinis pailgėjimas (Δl), mm
1					
2					

5. Iš gautų duomenų nubraižykite varinio laido ištempimo priklausomybės nuo įtampos grafiką.

6. Grafike pažymėkite sritis, kuriose ši priklausomybė atitinka Huko dėsnį, tamprumo ribą, atsparumo ribą.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Išvardykite kietojo kūno mechanines charakteristikas.

2. Kokią išvadą iš atskirų grafiko sričių galima padaryti dėl mechaninių medžiagų savybių?

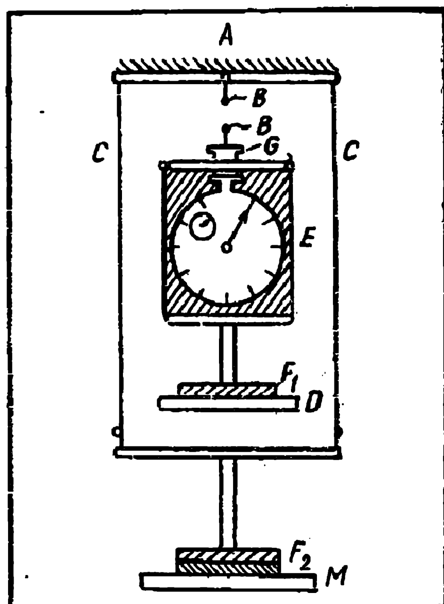
33. 3 DARBAS. JUNGO MODULIO NUSTATYMAS

Darbo tikslas: nustatyti laido medžiagos Jungo modulį. Laikrodinio tipo indikatoriumi nustatykite laido pailgėjimą.

Priemonės. 2 m ilgio ir 0,5 mm skersmens varinio laido pavyzdys, indikatorius, kuriuo galima atlikti matavimus 0,01 mm tikslumu, svarelių rinkinys, mikrometras.

Prietaiso aprašymas

Prie viršutinio kronšteino *A* (67 pav.), pritvirtinto prie sienelės, pritvirtinamas kalibruotas laidas *B*, kuriam nustatomas tamprumo modulis. Ant to paties kronšteino metaliniais siūlais *C* pakabinami svareliai F_2, kuriuos perkeliant ant platformos *D*, apkraunamas pavyzdys *B*. Taip įrengiant, viršutinis kronšteinas *A* visą laiką vienodai apkraunamas ir jo deformacija neturi įtakos tiriamo laido *B* pailgėjimo matavimo paklaidai. Pavyzdžio pailgėjimas matuojamas indikatoriumi *E*, kuris yra nejudomai pritvirtintas prie apatinio kronšteino *G*. Laikrodinio tipo indikatorius *E* tinka nustatyti nuo 0 iki 10 mm tempimą ir gniuždymą 0,001 mm tikslumu.



67 pav.

Darbo eiga

1. Apkraukite pavyzdį 1 N svareliu. Indikatoriaus rodyklę nustatykite ties nuline padėtimi.

2. Mikrometru išmatuokite laido (pavyzdžio) skersmenį.

3. Nuo plokštės *M* paeiliui perneškite 4 svarelius po 5 N ant platformos *D* ir pagal indikatoriaus parodymus užrašykite, kiek pailgėjo pavyzdys, uždėjus kiekvieną kartą svarelį.

F, N	5	10	15
σ			
$\Delta l \cdot 10^{-4}$			
ε			

4. Apskaičiuokite σ, ε reikšmes ir įrašykite į lentelę.

5. Per gautus taškus nubrėžkite grafiką σ ir ε koordinatėse ir apskaičiuokite Jungo modulį.

6. Atsižvelgdami į darbe naudotų matuojamųjų prietaisų tikslumą, apskaičiuokite gautojo rezultato paklaidą.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kodėl bandymo pradžioje apkraunamas pavyzdys ir indikatoriaus rodyklė nustatoma ties nuline padala?

2. Kokios rūšies deformaciją patiria šiuo atveju pavyzdys?

3. Palyginkite šio darbo rezultatų paklaidą su ankstyvesnio darbo rezultatų paklaida ir padarykite išvadas.

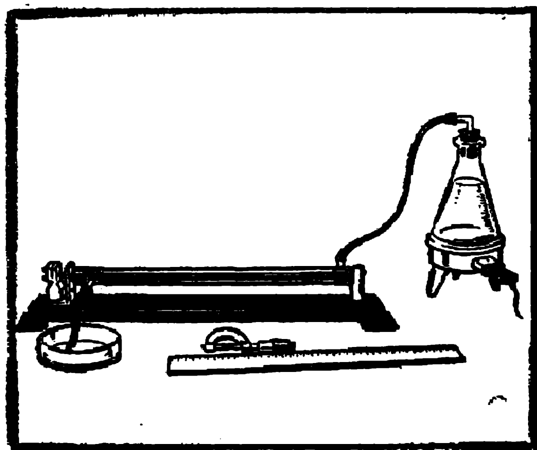
34. 4 DARBAS. KIETOJO KŪNO ŠILUMINIO PLĖTIMOSI NAGRINĖJIMAS

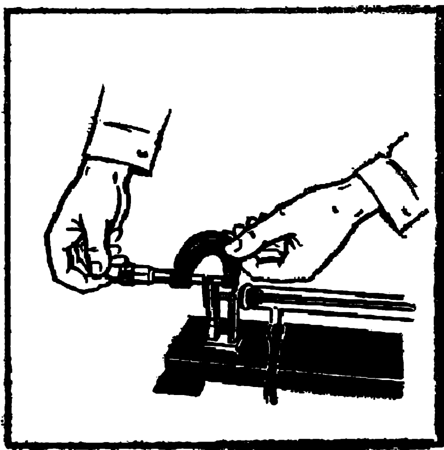
Šiluminį kietųjų kūnų plėtimąsi apibūdina linijinio plėtimosi koeficientas.

Linijinio plėtimosi koeficientas α randamas iš formulės: $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 (t - t_0)}$, čia $(t - t_0)$ — kūno temperatūros pokytis; Δl — jo ilgio absoliutinis pailgėjimas; l_0 — kūno ilgis t_0 temperatūroje.

Šis darbas apima kietųjų kūnų linijinio plėtimosi koeficiento nustatymą.

P r i e m o n ė s. Prietaisas kietųjų kūnų linijiniam plėtimuisi nagrinėti (68 pav.), kaitintuvas (elektrinė viryklėlė), 250 cm^3 talpos kolba su gumine žarnele arba stikliniu vamzdeliu garams išleisti, indelis, 50 cm ilgio milimetrinė liniuotė, mikrometras (arba indikatorius).


68 pav.


69 pav.

Darbo eiga

1. Išmatuokite 1 mm tikslumu pavyzdžio (strypo) ilgį.

2. Įstatykite strypą tarp prietaiso stovų, prieš tai jo vieną galą įdėkite į nejudamos atramos kiaurymę, po to antrąjį jo galą — į atraminį kronšteiną.

3. Prie strypo priglauskite judamą atramą ir mikrometru išmatuokite nuotolį (l_n) tarp jos ir stovo (69 pav.).

4. Į kolbą įpilkite 2/3 jos tūrio vandens, garų išleidžiamuoju vamzdeliu ją sujunkite su prietaiso specialiu stikliniu vamzdžiu ir kolbą padėkite ant kaitintuvo.

5. Kitame stiklinio vamzdžio gale esančią guminę žarnelę įdėkite į indelį, kuriame rinksis vanduo.

6. Įjunkite kaitintuvą, įkaitinkite garintuve (kolboje) vandenį, kol jis ims virti, ir po kelių minučių nuo virimo pradžios vėl išmatuokite mikrometru nuotolį (l_k) tarp stovo ir judamos atramos.

7. Apskaičiuokite strypo pailgėjimą $\Delta l = l_k - l_n$.

8. Matavimo duomenis surašykite į lentelę.

9. Apskaičiuokite koeficiento reikšmę

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l(t - t_0)}.$$

10. Apskaičiuokite didžiausią santykinę paklaidą iš formulės:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta(100°C - t)}{100°C - t}.$$

Medžiagos pavadinimas	l_0, mm	l_n, mm	l_k, mm	Δl, mm	$t_n : t_k$	$t_k - t_n$, deg	α, deg^{-1}
Aliuminis							
Plienas							
Žalvaris							

Apskaičiuojant paklaidas, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad mikrometru galima išmatuoti 0,01 mm, masteline liniuote iki 1 mm ir termometru — geriausiu atveju — 0,5° tikslumu.

Iš skaičiavio matyti, kad daugiausia paklaida gaunama, mikrometru matuojant strypo pailgėjimą.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kodėl kaitinami kūnai plečiasi?

2. Ar monokristalams galima taikyti formulę $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0(t - t_0)}$ **?**

3. Išreikškite kubinio plėtimosi koeficientą per linijinio plėtimosi koeficientą.

35. 5 DARBAS. VANDENS ŠILUMINIO PLĖTIMOSI SAVYBIŲ NAGRINĖJIMAS

Norint suprasti ir skysto, ir kristalinio vandens savybes, reikia žinoti vandens molekulių sandarą. Vandens molekulė, kaip ir kitos molekulės, sudaryta iš atomų, kurių išsidėstymą nulemia valentinių elektronų pasiskirstymo pobūdis.

Ledo kristale tarp vandens molekulių yra vandenilinė jungtis. Ji atsiranda, susidarant kovalentinei jungčiai tarp vienos molekulės vandenilio atomo ir kitos molekulės deguonies atomo.

Vandens molekulė yra sudėtingos geometrinės formos. Ši sudėtinga forma priklauso nuo tinklinės, ažūrinės kristalo sandaros. Joje daug tuštumų. Šių tuštumų matmenys šiek tiek didesni už molekulės skersmenį. Kiekviena molekulė apsupta šešiais tuštumų centrais. Tuštumos sudaro kanalus, apsuptus šešių vandens molekulių sudarytais žiedais.

Dėl tokios ledo kristalo sandaros ledas nėra tankus.

Medžiagos, turinčios tarp molekulių vandenilines jungtis, besilydydamos iš dalies jų netenka. Pagal rentgenografines nuotraukas nustatyta, kad vandenyje molekulės išsidėsčiusios panašiai kaip ir lede. Tačiau molekulių išsidėstymo tiksli tvarka, ledui

tirpstant, šiek tiek sutrinka — tuštumos iš dalies užsipildo ir tankumas padidėja.

Kaitinant vandenį nuo 0 iki 4°C, toliau kinta erdvinė struktūra. Dėl tankesnio molekulių supakavimo tūrio sumažėjimo efektas esti didesnis už šiluminio molekulių judėjimo pasekmes. Todėl šildomo nuo 0 iki 4°C vandens mažėja tūris ir didėja tankis. Toliau šildomo vandens tūris didėja.

Reikia pažymėti, kad vanduo nėra vienintelė medžiaga, kurioje pastebima šiluminio plėtimosi anomalija. Pavyzdžiui, deimantas pradeda plėstis, atšaldytas žemiau −42°C, sidabro jodidas — šildomas nuo −10 iki +142°C.

Šio darbo tikslas — nustatyti vandens tūrio kitimo koeficientą, kaitinant vandenį įvairiuose temperatūrų intervaluose: 0—4°C; 4—10°C ir 10—20°C.

Priemonės. 0,5 l talpos plonasienė stiklinė kolba, kamštis su įstatytu vamzdeliu, kurio vidinis skersmuo 2,0 mm, o aukštis 400 mm, įstatytas į kamštį termometras, turintis 0,5°C padalas, 2—3 l indas, menzūrėlė.

Darbo eiga

1. Į didelį indą pripilkite šalto vandens ir į jį dėkite ledo gabaliukų, kol temperatūra pasieks 0°C.

2. Tiksliai išmatuokite kolbos tūrį V_0.

Išmatuokite vamzdelio skersmenį R. Tam pasigaminkite popierinį 1 cm aukščio trikampį, turintį 10 cm pagrindą (70 pav.). Į sausą vamzdelį įkiškite smailų trikampio galą taip, kad vamzdelio kraštai liestų trikampio ACB šonus CA ir CB. Tarkime, kad vamzdelio kraštai sutapo su padala *4*. Tai reiškia, kad vamzdelio skersmuo yra 4 mm.

3. Plonasienę kolbą pripildykite 0°C temperatūros vandens ir užkimškite kamščiu su įstatytu vamzdeliu ir termometru. (Į kolbą pripilkite vandens tiek, kad jo lygis vamzdelyje pakiltų apie 5 cm virš kamščio. Po to kolboje neliks oro ir kolba bus hermetiška.)

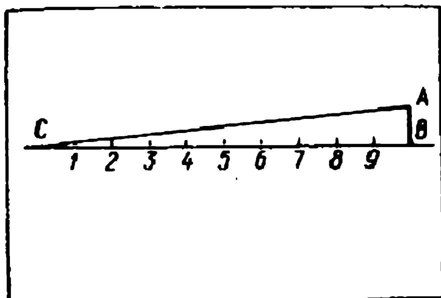
4. Įmerkite kolbą į didelį indą su vandeniu.

5. Pildami karštą vandenį į didelį indą, įkaitinkite kolbą iki 20°C.

6. Stebėkite vandens lygio kritimą vamzdelyje, kaitinant vandenį nuo 0 iki 4°C.

7. Stebėkite vandens lygio kilimą vamzdelyje, kaitinant vandenį nuo 4 iki 20°C.

8. Užrašykite vandens lygio kitimą vamzdelyje ir atitinkamus termometro parodymus.



70 pav.

9. Iš stebėjimo duomenų padarykite išvadas.

10. Sudarykite lentelę dviem temperatūrų intervalams: 1) 4—10°C ir 2) 10—20°C.

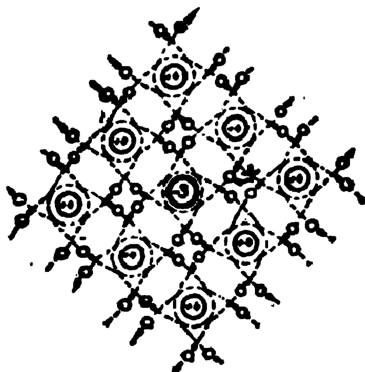
Eil. Nr.	V_0	R	S	h	β_{stiklo}	$\Delta V_{vandens}$	ΔV_{stiklo}	$\Delta t_{vandens}$	$\beta_{vandens}$

11. Atsižvelgdami į stiklo plėtimąsi, apskaičiuokite vandens tūrinio plėtimosi koeficientą.

12. Padarykite išvadas dėl vandens tūrinio plėtimosi koeficiento.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kuo paaiškinamas vandens anomalinis reiškinys, kaitinant nuo 0 iki 20°C?
2. Ar visos medžiagos pasižymi tokiomis savybėmis, kaip vanduo?



KIETŲJŲ KŪNŲ ELEKTRINĖS IR MAGNETINĖS SAVYBĖS

VII SKYRIUS

KIETŲJŲ KŪNŲ ELEKTRINĖS SAVYBĖS

Pagal gebėjimą praleisti elektros srovę gamtoje visos medžiagos skirstomos į tris pagrindines klases: *laidininkus, puslaidininkius ir dielektrikus.*

Nors puslaidininkiai jau buvo žinomi XIX amžiaus antroje pusėje, tačiau juos kruopščiai tyrinėti imta tik dabar, XX amžiuje. Todėl klausimas, kuo skiriasi laidininkas nuo izoliatorių, buvo viena iš svarbiausių problemų, kurią daugelį dešimtmečių tyrinėjo mokslininkai.

Terminas „laidininkas" buvo pirmą kartą pavartotas 1729 metais, kai buvo nustatyta, kad metalais ir drėgnais pluoštais elektriniai efektai (elektrizacija) gali plisti iš vienos vietos į kitą. Vėliau buvo nustatyta, kad elektros srovė įšildo laidininką, kad apie laidininką, kuriuo teka elektros srovė, susidaro magnetinis laukas, įvesta elektrinės varžos sąvoka ir t. t.

Taigi eksperimentinių faktų, susijusių su elektros srovės tekėjimu pro kai kuriuos kietus kūnus, skaičius didėjo, o teorijos, kuri nustatytų tų reiškinių ryšį, nebuvo. Iš pradžių analogiškai „šiluminio skysčio" teorijai kilo idėja, kad egzistuojąs elektrinis skystis, tačiau ši idėja neturėjo konkretaus pagrindo ir nepajėgė išaiškinti žinomų elektrinių reiškinių.

1832 m. žinomas anglų fizikas Maiklas Faradėjus, tyrinėdamas elektrolizės reiškinį, nustatė dėsnius, kuriais remiantis buvo sukurta atominė, arba diskretinė, elektros prigimties teorija. Api-

būdindamas tą sąvokų apie kietųjų kūnų laidumą vystymosi periodą, amerikiečių fizikas R. Milikenas rašė: „Tarp 1833 ir 1900 metų fizikas buvo labai kuriozinėje būklėje. Kai jis galvojo, kaip elektros srovė praeina pro tirpalą, sekdamas Faradėjumi, įsivaizdavo: tirpalu praeina nustatyti elektros taškai arba atomai, todėl kiekvienas medžiagos atomas nešasi taškinį, kartotinį elementariam atomui, elektros krūvį. Kuomet jis galvojo apie elektros srovės tekėjimą metaliniu laidininku, jis visai atmetė atomistinę hipotezę ir stengėsi šį reiškinį paaiškinti, kaip nenutrūkstamą „poslinkį" arba „įtempimo pažeidimą" laido medžiagoje. Kitaip sakant, jis pripažino dvi skirtingas elektrinio laidumo rūšis: metalų laidumą ir elektrolitų laidumą, o kadangi dauguma fizikų nagrinėjo metalus, tai hipotezė apie elektros atominę sandarą buvo beveik, tačiau ne visiškai, užmiršta [1]".

1897 m. anglų fizikas Dž. Tomsonas atrado elektroną; tai padėjo jam ir vokiečių fizikui P. Drudei (1863—1906) sukurti klasikinę metalų elektroninę laidumo teoriją, kuri XX amžiaus pradžioje sėkmingai padėjo išspręsti daugelį problemų ir tapo labai populiari. Įžymus olandų fizikas G. Lorencas (1853—1928) savo veikaluose šią teoriją pavadino elektronų teorija, ją visapusiškiau išvystė ir suteikė aiškią, gana tikslią matematinę formą. Mokykloje nagrinėjame tik klasikinę elektronų teoriją. Prisiminkime jos pagrindinius teiginius [2].

36. METALŲ LAIDUMO KLASIKINĖ ELEKTRONŲ TEORIJA

Šios teorijos pagrindinė mintis yra ta, kad metaluose yra laisvųjų elektronų, kurie sudaro savotiškas elektronines dujas, panašias į idealiąsias dujas.

Elektroninių dujų koncentraciją, t. y. elektronų kiekį metalo tūrio vienete, galima apskaičiuoti (žr. VII skyr. uždavinius). Pavyzdžiui, sidabro elektronų koncentracija $n_0 \approx 10^{28}$ m^{-3}.

Esant tokiai didelei elektronų koncentracijai, jų tarpusavio sąveikos jėgos, kaip ir elektronų sąveikos jėgos su metalų gardelės jonais, yra labai didelės. Tačiau visų kitų elektronų ir jonų vidutinė jėga, veikianti kiekvieną elektroną, yra lygi nuliui ir todėl tokį elektroną galima laikyti laisvuoju, kuris su gardelės jonais sąveikauja tik tamprių susidūrimų metu. Taigi elektroninės dujos, kaip ir idealiosios dujos, turi tik kinetinę energiją $\frac{m\overline{v_T^2}}{2} = \frac{3}{2}kT$; čia m — elektrono masė, $\overline{v_T^2}$ — greičio kvadrato vidutinė vertė, k — Bolcmano konstanta, T — absoliutinė temperatūra. Iš šios

[1] Милликен Р. Электроны (+ и —), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи. М.-Л., 1939, p. 23.

[2] Elementarios žinios apie metalų klasikinę elektronų teoriją pateiktos VIII ir X kl. fizikos kursuose.

reikšmės galima nustatyti elektrono šiluminio judėjimo greičio kvadrato vidutinę vertę:

$$\overline{v_T} = \sqrt{\overline{v_T^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

Kai vyksta chaotiškas elektronų šiluminis judėjimas ir jie nuolat susiduria su kristalinės gardelės jonais, negalima nustatyti krūvių judėjimo krypties — laidininke nėra elektros srovės. Vadinasi, srovė gali atsirasti, tik veikiant elektriniam laukui, kuris suteikia visiems elektronams papildomą „dreifinį" greitį, nukreiptą išilgai lauko.

Pagal šią elektronų teoriją pavyko teoriškai nustatyti elektros srovės metaluose pagrindinį dėsnį — Omo dėsnį grandinės daliai: $I = \gamma U$: čia proporcingumo koeficientas γ, vadinamas specifiniu metalo laidumu. Pagal elektronų teoriją

$$\gamma = \frac{n_0 e \overline{\lambda}}{2m\overline{v}_T};$$

čia $\overline{\lambda}$ — elektrono vidutinis laisvo kelio ilgis, kuris pagal dydžių eilę turėtų būti lygus metalo kristalinės gardelės periodui, t. y. 10^{-8} cm.

Drude ir Lorenco elektronų teorija taip pat padėjo išaiškinti, kodėl elektros srovė išskiria šilumą. Elektrinis laukas atlieka darbą ir metaluose elektronams suteikia pagreitį. Jų sukaupta energija, susiduriant su jonais, perduodama gardelei ir metalas įkaista. Iš to galima teoriškai išvesti Džaulio ir Lenco dėsnį.

Vienas iš klasikinės elektronų teorijos laimėjimų yra ryšio tarp metalų elektrinio laidumo ir jų šiluminio laidumo paaiškinimas. Iš tiesų, laidumo elektronai, turėdami šiluminio judėjimo energiją, dalyvauja pernešant šilumą metaluose, ir kuo didesnė koncentracija n_0 — nuo jos priklauso elektrinis laidumas,— tuo geresnis metalo šiluminis laidumas. Dar 1853 m. I. Videmanas ir R. Francemas bandymais nustatė metalų elektrinio laidumo ir jų šiluminio laidumo tiesioginį proporcingumą. Jų nustatytas dėsnis išreiškiamas lygtimi: $\frac{x}{\gamma} = AT$; čia x — šiluminio laidumo koeficientas, T — absoliutinė temperatūra, A — konstanta. Remdamasis elektronų teorija, Lorencas apskaičiavo šią konstantą.

Metalų laidumo klasikinė elektronų teorija yra pagrįsta šiais pagrindiniais bandymais.

1901 m. fizikas E. Rike atliko bandymą. Pro tris metalinius (varinį, aliuminį ir varinį) vienodo skersmens ir glaudžiai vienas su kitu sujungtais, gerai nušlifuotais galais cilindrus labai ilgai (apie metus) buvo leidžiama srovė. Tuo laikotarpiu pro cilindrus praėjo $3{,}5 \cdot 10^6$C krūvis. Tiksliai ($0{,}03 \cdot 10^{-3}$ mg tikslumu) pasvėrus cilindrus prieš bandymą ir po bandymo, rasta, kad jų masė nepakito. Iš to buvo nustatyta, kad metalų laidumą sukelia bendrų visiems metalams, įkrautų dalelių (srovės „nešėjų") judėjimas.

1912 m. tarybiniai fizikai L. Mendelštamas ir N. Papaleksis iš fizikos kurso žinomu bandymu stebėjo metaliniuose laidininkuose įkrautų dalelių inercinį judėjimą ir patvirtino, kad **metaluose yra tokių dalelių, kurios silpnai susijusios su kristaline gardele.**

1916 m. amerikiečių fizikai Tolmenas ir Stiuartas vietoj telefono, kurį naudojo L. Mendelštamas ir N. Papaleksis, pritaikė jautrų galvanometrą ir įrodė, kad dalelės, sukeliančios inercinę srovę, stabdant ritę, turi n e i g i a m ą e l e k t r i n į k r ū v į, taip pat apskaičiavo *šių dalelių specifinį krūvį* $\frac{e}{m}$. Jie gavo: $\frac{e}{m}=$ $=4{,}8\cdot10^{17}$ CGSE krūvio vienetų/g. Jis artimas specifiniam elektrono krūviui, apskaičiuotam bandymuose pagal elektronų pluošto atsilenkimą elektriniuose ir magnetiniuose laukuose. Taigi Tolmeno ir Stiuarto darbuose metalų elektroninė laidumo teorija įgijo tvirtą eksperimentinį pagrindą.

Tačiau greitai buvo nustatyta, kad pagrindinė šios teorijos idėja — elektroninių dujų, panašių į idealiąsias dujas, egzistavimas metaluose — nesutiko su kai kuriais bandymų duomenimis.

Jau § 17 buvo pažymėta, kad metalo molinis šilumos talpumas, apskaičiuotas pagal elektronų teoriją, turi būti lygus 37,5 J/(mol • deg), o tas pats šilumos talpumas, rastas eksperimentiškai,— 25 J/(mol·deg). Tokį pat rezultatą galima gauti ir teoriškai, tačiau reikia laikyti, kad elektroninės dujos neturi šiluminio talpumo. Sutikite, kad panašus samprotavimas atrodys labai keistas, nes pagal elektronų teoriją metalų temperatūra priklauso ne tik nuo atomų svyravimo gardelėje energijos, bet ir nuo elektronų judėjimo energijos.

Šio ir kitų faktų negalėjo paaiškinti klasikinė elektronų teorija, nes ji ne į viską atsižvelgė. Tik aiškinant kietųjų kūnų elektrines savybes pagal kvantinę mechanikos teoriją, buvo sukurta elektrinio laidumo teorija, kurios išvados visiškai sutampa su eksperimentiniais duomenimis.

22 užduotis. 1. Paruoškite pranešimą tema „Srovės nešėjų koncentracijos nustatymas pagal Holo efektą".
2. Papasakokite apie L. Mendelštamo gyvenimą ir veiklą.
3. Papasakokite apie N. Papaleksio gyvenimą ir veiklą.

Literatūra. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. I. M., «Наука», 1974, p. 446 (pirmam klausimui).
Ливанова А. М. Физики о физиках. M., «Молодая гвардия», 1968 (antram klausimui).
«Физика в школе», 1972, № 4 (trečiam klausimui).

37. DIELEKTRIKAI

Nagrinėdami dielektrikus per fizikos pamokas, sužinojote tokias šių medžiagų savybes.

1. Dielektrikai gerai įsielektrina trinant ir atsiradusį krūvį ilgai išlaiko (gintaras — pirmasis žinomas dielektrikas).

2. Dielektrike esančių krūvių sąveikos jėga mažesnė už sąveikos jėgą tarp tų pačių krūvių, taip pat išsidėsčiusių ore.

3. Tarp kondensatoriaus plokštelių padėjus dielektriką, kondensatoriaus elektrinis talpumas padidės. Šis reiškinys plačiai taikomas įvairių kondensatorių gamyboje.

4. Elektriniame lauke laikomo dielektriko paviršiuje atsiranda susiję krūviai.

1880 m. prancūzų mokslininkai fizikai Pjeras ir Žakas Kiuri atrado *pjezoelektrinį*[1] *efektą*.

Pjezoelektrinio efekto esmė yra tokia. Iš kvarco (kvarcas yra dielektrikas) kristalo išpjautą plokštelę spaudžiant tarp dviejų elektrodų, jų paviršiuje atsiranda vienodo didumo, tačiau priešingų ženklų krūviai.

Pakeitus jėgos, veikiančios plokštelę, kryptį (kvarcą tempiant), elektrodų paviršiuje pakinta ir krūvių rūšys: tempiant elektrodo paviršiuje atsiranda neigiamas krūvis (slegiant buvo teigiamas krūvis). Be to, kuo didesnė plokštelę slegianti arba tempianti jėga, tuo didesnis krūvis atsiras elektrodų paviršiuje.

XIX amžiaus viduryje taip pat buvo rasti dielektrikai, kurie, panašiai kaip ir nuolatiniai magnetai, buvo „nuolat poliarizuoti", t. y. turėjo liekamąją poliarizaciją. Tokie dielektrikai, panašiai kaip terminas „magnetas", buvo pavadinti *elektretais*[2].

Dabar elektretai gaminami iš vaško ir tam tikrų dervų, kurios ištirpintos laikomos stipriame nuolatiniame elektriniame lauke, kol sukietėja ir ataušta iki kambario temperatūros. Yra ir kitų elektretų gamybos būdų.

Pati būdingiausia elektretų savybė yra ta, kad jie gali sukaupti savo priešinguose paviršiuose skirtingo ženklo krūvius ir gana ilgai išlaikyti. Pavyzdžiui, elektretai iš karnaubo vaško[3] ir jo mišinių išlaiko krūvį kelis metus, keramikiniai elektretai išlaiko krūvį du metus, polimeriniai elektretai — mėnesius.

Paaiškinti šią gausią eksperimentinę medžiagą apie elektrines dielektrikų savybes tapo įmanoma tik tada, kai pasirodė teorija apie kietųjų kūnų sandarą ir jų struktūrinių dalelių jungtis.

Yra tokių kietųjų kūnų, kuriuose atskirų atomų arba molekulių teigiamų ir neigiamų krūvių centrai sutampa (medžiagos su nepolinėmis molekulėmis). Laikomose elektriniame lauke tokiose medžiagose atsiranda struktūrinių dalelių „elektrinė deformacija", t. y. elektrinis laukas perstumia dielektriko elektrinius krūvius iš tos padėties, kurią jie užėmė neelektriniame lauke. Pavyzdžiui, jei dielektriką sudaro neutralūs atomai, tai elektriniame lauke jo

---

[1] Pjezo (gr.) — *spausti*. Pjezoelektra reiškia elektrą, kuri atsiranda slegiant.

[2] Anglų kalboje abu terminai turi tą pačią galūnę: magnet, electret.

[3] Karnaubo vaškas renkamas nuo vaškinės karnaubo palmės. Šis 10—15 m aukščio medis auga Brazilijoje. Jo vėduoklės formos lapai (2 m ilgio) aptraukti storu vaško sluoksniu. Vienas toks medis per metus duoda 0,5—2 kg vaško. Anduose auga 50—60 m aukščio andų palmės, jų kamienas padengtas vaško sluoksniu. Iš šios palmės surenka 10 kg vaško per metus.

elektroniniai apvalkalai pasislenka teigiamai įelektrintų branduolių atžvilgiu. Jei kietojo kūno kristalinę gardelę sudaro teigiami ir neigiami jonai, kaip, pavyzdžiui, Na Cl gardelė, tai elektriniame lauke skirtingų ženklų jonai pasislenka vienas kito atžvilgiu. Dėl tampraus kiekvienos krūvių poros poslinkio susidaro sistema, turinti papildomą momentą $p=ql$, o visas dielektrikas poliarizuojasi.

Dielektrikų poliarizaciją apibūdina *tūrio vienetui tenkantis dipolio momento P kiekis,* kuris lygus medžiagos tūrio vienete esančių elementariųjų dipolių $\vec{pi}$ vektorinei sumai $\vec{P}=\sum\limits_{n}\vec{pi}$.

Galima įrodyti, kad dielektriko tūrio vieneto dipolio momentas yra proporcingas dielektriko viduje esančio elektrinio lauko stiprumui: $P \sim E$.

Be nepolinių dielektrikų, yra didžiulė klasė dielektrikų, kurių molekulės, ir nebūdamos elektriniame lauke, turi dipolio momentą. Pastovų dipolio momentą gali turėti daugelis molekulių, kuriose teigiamų ir neigiamų krūvių simetrijos centrai nesutampa (polinės molekulės). Ledas, kieta druskos rūgštis, organinis stiklas ir kt. yra būdingi kieti poliniai dielektrikai.

Padėjus polinį dielektriką elektriniame lauke, polinės molekulės (dipoliai) orientuojasi taip, kad jų ašys sutaptų su elektrinio lauko jėgų linijų kryptimi. Tačiau tokiai orientacijai priešinasi medžiagos dalelių šiluminis judėjimas. Veikiant laukui ir šiluminiam judėjimui, nusistovi pusiausvyra, kuriai esant, polinės molekulės įgyja išskirtinę orientaciją, o visas dielektrikas įgyja lauko kryptimi dipolio momentą, t. y. poliarizuojasi.

Nagrinėta poliarizacijos rūšis vadinama *orientacine, arba dipoline.* Šiai poliarizacijai, kitaip kaip poslinkio poliarizacijai, didelę reikšmę turi dielektriko temperatūra.

Polinių dielektrikų dielektrinė konstanta didesnė, negu nepolinių, nes juose pastebimos abi poliarizacijos rūšys: *orientacinė* ir *tampraus poslinkio poliarizacija.*

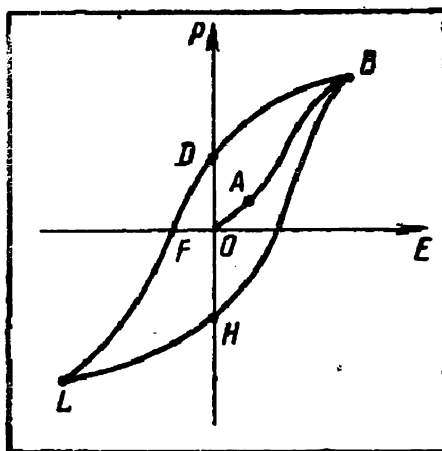
Pašalinus išorinį elektrinį lauką, poliniai ir nepoliniai dielektrikai išsipoliarizuoja, t. y. praktiškai išnyksta poliarizacija.

Yra ir trečia dielektrikų rūšis — juose pasireiškia savaiminė (spontaninė) poliarizacija. Tuo atveju dielektriko viduje be jokio išorinio lauko poveikio savaime atsiranda vienodai poliarizuotos sritys, vadinamieji *domenai.* Kai nėra išorinio lauko, srityse dipolio momentų kryptys skirtingos. Atsiradus laukui, vyksta momentų „orientacija“ ir visas dielektrikas poliarizuojasi. Kadangi kiekvienas domenas turi didelį dipolio momentą, tai tokių dielektrikų elektrinė konstanta labai didelė, 10^4 eilės. Tokios rūšies dielektrikai vadinami *segnetoelektrikais.*

Segnetoelektrikai nuo kitų dielektrikų skiriasi specifinėmis savybėmis.

Jei polinių ir nepolinių dielektrikų tūrio vieneto dipolio momentas yra proporcingas elektrinio lauko stiprumui *E,* tai segnetoelektrikuose tokia linijinė *P* ir *E* priklausomybė yra tik silp-

nuose laukuose (71 pav. *OA* atkarpa). Didėjant elektrinio lauko stiprumui, didėja dipolio momentas *P* pagal kreivę *AB*, o pasiekus tam tikrą lauko stiprumą *E*, dipolio momentas daugiau nebekinta (taškas *B*). Ši būsena vadinama *prisotinimu*. Aišku, kad prisotintoje būsenoje visi segnetoelektriko domenai išsidėsto išilgai lauko ir tolesnis lauko *E* didėjimas jau nesukelia poliarizacijos didėjimo. Po to lauko stiprumą sumažinus iki 0, kristalo poliarizacija mažės ne pagal pradinę kreivę *OB*, o pagal kreivę *BD*; kai lauko stiprumas pasieks 0, kristalas bus poliarizuotas. Toks reiškinys vadinamas dielektriko *histereze*[1]. Poliarizacijos didumas, kurį vaizduoja *OD* atkarpa, kai $E=0$, vadinamas liekamąja poliarizacija.



71 pav.

Norint panaikinti liekamąją poliarizaciją, reikia pakeisti elektrinio lauko kryptį priešinga. Tuomet, esant tam tikrai elektrinio lauko stiprumo reikšmei *OF*, liekamoji poliarizacija išnyks. Toliau didinant lauko stiprumą, poliarizacija vėl pasieks prisotinimo būseną (tašką *L*). Mažinant lauko stiprumą iki nulio, pasireikš liekamoji poliarizacija *OH* ir t. t.

Taigi segnetoelektrikų poliarizacijos priklausomybės nuo kintamo elektrinio lauko stiprumo nubrėžta kreivė *BDFLHB* vadinama histerezės kilpa. Pagal histerezės kilpą galima nustatyti dielektrikų spontaniškos poliarizacijos didumą.

Segnetoelektrikų liekamoji poliarizacija nepakisdama gali išsilaikyti daugelį metų.

Tačiau pakėlus temperatūrą, segnetoelektrikų savybės kinta, ir temperatūroje, vadinamoje Kiuri temperatūroje, spontaninė poliarizacija išnyksta.

Šiuo metu iš segnetoelektrikų plačiai gaminami segnetoelektriniai kondensatoriai, kurių elektrinis talpumas didelis, o jie patys yra paprasti ir mažų matmenų.

Dėl didelio pjezoefekto, gero mechaniško atsparumo ir gamybos paprastumo segnetoelektriniai pjezoelementai sėkmingai konkuruoja su klasikiniu pjezoelektriku — kristaliniu kvarcu. Segnetoelektrikai taip pat naudojami lazerių, skaičiavimo mašinų atminties elementų gamyboje.

23 užduotis. 1. Paruoškite pranešimą apie praktišką pjezoelektros pritaikymą. 2. Papasakokite apie elektretų panaudojimo perspektyvas.

[1] Histerezė — pavėlavimas.

Literatūra. Плонский А. Ф. Пьезоэлектричество. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1966 (pirmam klausimui).
Губкин А. Н. Электреты. М., Изд-во АН СССР, 1961 (antram klausimui).

38. ELEKTRONŲ ENERGIJOS KVANTAVIMAS ATOME

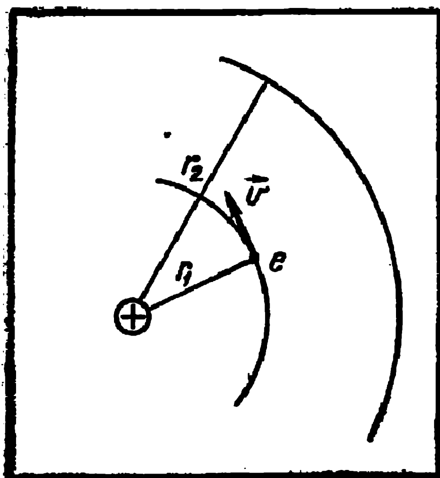
Išnagrinėjome metalų ir dielektrikų elektrines savybes. Nesunku pastebėti, kad, aiškinant šias savybes, taikomos viena su kita nesusijusios, skirtingais modeliais pagrįstos teorijos. Tik pritaikius kvantinės mechanikos vaizdinius, pavyko sukurti vieningą šiuolaikinę kietojo kūno teoriją, arba zoninę teoriją. Šios teorijos išraiška labai sudėtinga, tačiau pagrindinę jos idėją reikia pasistengti suprasti.

Pirmiausia, reikia turėti omenyje, kad makroskopinių kūnų judėjimo dėsnių negalima taikyti atominėms dalelėms. Pavyzdžiui, žinome, kad iš bet kokio aukščio krintančio sviedinio kinetinė energija visą laiką didėja, o potencinė mažėja. O štai atomuose, molekulėse, kristaluose elektrono energija negali turėti bet kokias reikšmes. Pagal kvantinę mechaniką nurodoma, kad elektronas tokiais atvejais gali turėti tik nustatytą, diskretinę energijos reikšmę. Taigi, jei atstumu tarp branduolio ir elektrono r_1 (72 pav.) elektrono energija E_1, tai atstumu r_2 — elektrono energija E_2, be to, $\Delta E = E_2 - E_1$ turi visiškai apibrėžtą reikšmę. Elektronas negali turėti didesnės energijos kaip E_1 ir mažesnės kaip E_2. Apie dydžius, kurie gali turėti tik tam tikras diskretines reikšmes, fizikoje sakoma, kad jie yra k v a n t u o t i. Atomuose, molekulėse ir kristaluose toks dydis yra elektronų energija.

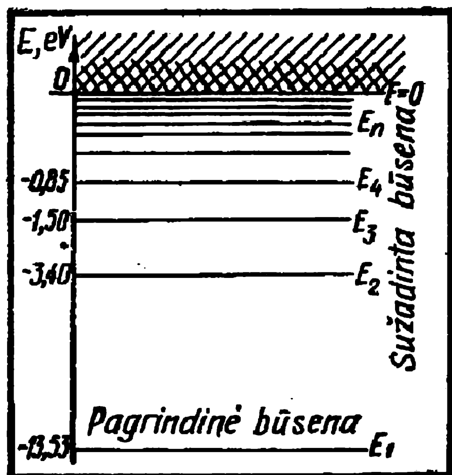
Elektronų energijos kvantuotos reikšmės (teisingiau sakyti atomo energija, nes čia kalbama apie elektrono ir branduolio sąveikos potencinę energiją) vaizduojamos diagramoje energijos lygiais. Kiekvienas energijos lygis apibūdina galimą atomo energijos būseną.

73 paveiksle parodyta vandenilio atomo energijos lygių diagrama, arba vandenilio atomo *energijos spektras*. Pats žemiausias energijos lygis E_1 atitinka elektrono būseną, kai jis yra arčiausia branduolio, ir apibūdina pagrindinę arba *normalią* (nesužadintą) atomo būseną. Tokią energiją E_1 turi atomas, kol jis negauna išorinės energijos. Pagrindinėje būsenoje izoliuotas atomas gali būti kiek norima ilgai.

Visi energijos lygiai, pradedant antruoju, atitinka atomo *sužadintą* būseną. Šias energijos vertes vandenilio atome gali turėti elektronas, veikiamas išorinių veiksnių (šviesos, radioaktyvių spindulių, susidurdamas su kitais elektronais, kaitinamas ir kt.), kai jis įgyja papildomą energiją, lygią $\Delta E = E_m - E_n$; čia m ir n viršutinio ir apatinio energijos lygių, tarp kurių pereina elektronai, indeksai. Ilgą laiką elektronas sužadintoje būsenoje negali būti (nestabili sistema), todėl jis, atiduodamas energijos pertek-



72 pav.



73 pav.

lių $\Delta E = E_n - E_m$ (elektromagnetinius spindulius — šviesą), savaime pereina į normalią būseną.

Šioje diagramoje taip pat matyti, kad vandenilio atome elektrono energijos reikšmė neigiama. Tai reiškia, kad *nulinė* **energija atitinka būseną, kurioje yra nejudantis, labai nutolęs nuo branduolio ir su juo nesąveikaujantis elektronas.**

Norint pervesti elektroną į šią būseną, t. y. atplėšti elektroną nuo branduolio, su kuriuo jis yra susietas kulono traukos jėgomis, reikia, kad išorinės jėgos atliktų darbą, vadinamą tos būsenos *atomo jonizacijos darbu.* Aišku, kad jonizacijos darbas A_j lygus atitinkamoje būsenoje esančio atomo absoliutiniam energijos dydžiui: $A_j = |E_n|$.

Vandenilio atomo kvantinės energijos reikšmę galima rasti pagal formulę: $E_n = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\cdot\frac{1}{n^2}$; čia m — elektrono masė, e — elektrono krūvis, h — Planko konstanta (šis dydis kvantinėje mechanikoje labai svarbus, jo skaitinė reikšmė $h = 6{,}62\cdot10^{-34}$ J·s); ε_0 — vakuumo dielektrinė konstanta; n — pagrindinis kvantinis skaičius. Jis nusako atomo energijos lygį. Vandenilio atomo energijos lygis, atitinkantis pagrindinę atomo būseną ($n=1$), $E_1 = -13{,}53$ eV (elektronvoltas) — energijos vienetas atominėje fizikoje. 1 eV energiją įgyja elektronas, praeidamas elektrinio lauko tarpą, kuriame yra 1 V potencialų skirtumas (1 eV$=1{,}6\cdot10^{-19}$ J).

Nagrinėjant atomo energijos spektrą, reikia atkreipti dėmesį ir į tai, kad, didėjant pagrindiniam kvantiniam skaičiui n, sutankėja energijos lygiai. Kai n pakankamai didelis, galima laikyti, kad atomo energija praktiškai ne kvantiškai, o nenutrūkstamai kinta (73 paveiksle ištisinio spektro sritis užbrūkšniuota). Tai sudaro *atotykio principo* esmę. Jį nustatė 1922 m. N. Boras: esant dideliems kvantiniams skaičiams, kvantinės mechanikos

išvados ir rezultatai turi atitikti klasikinės fizikos rezultatus. Bendriau formuluojant, atotykio principas teigia, kad **kiekviena fizikos teorija, apibendrinanti ir vystanti klasikinę fiziką, kraštutiniu atveju turi pereiti į senąją teoriją.**

Išnagrinėjome paprasčiausio atomo, vandenilio atomo, diagramą, tačiau ir sudėtingiems atomams, turintiems didelį branduolio krūvį (Ze^+) ir didelį elektronų skaičių Z tinka tos pačios pagrindinės išvados, kaip ir vandenilio atomui:

1. Atome visi elektronai turi kvantuotos energijos reikšmes.
2. Elektronai gali pereiti iš vienos energijos būsenos į kitą. Tuo atveju energija išspinduliuojama arba sugeriama tiksliai nustatytomis porcijomis $\Delta E = E_m - E_n$.
3. Kiekvienas sudėtingo atomo elektronas turi neigiamą krūvį.
4. Kuo toliau nuo branduolio yra elektronas, tuo jis turi didesnę energiją.

Šiuo metu eksperimentiškai nustatyta, kad kiekvienam atomui tinka kvantinis dėsningumas.

24 užduotis. 1. Paruoškite pranešimą apie N. Boro gyvenimą ir veiklą.
2. Paruoškite informaciją apie M. Planko gyvenimą ir veiklą.

Literatūra. Мур Р. Нильс Бор — человек и ученый. М., «Мир», 1969. Нильс Бор. Жизнь и творчество. М., «Наука», 1967 (pirmam klausimui). Макс Планк. Сборник к столетию со дня рождения, 1858—1958. М., Изд-во АН СССР, 1958 (antram klausimui).

39. KRISTALŲ ZONINĖS TEORIJOS ELEMENTAI

§ 38 buvo išnagrinėtas izoliuoto atomo energijos spektras. Panagrinėsime, kaip pasikeis ta diagrama dviatomės molekulės atveju.

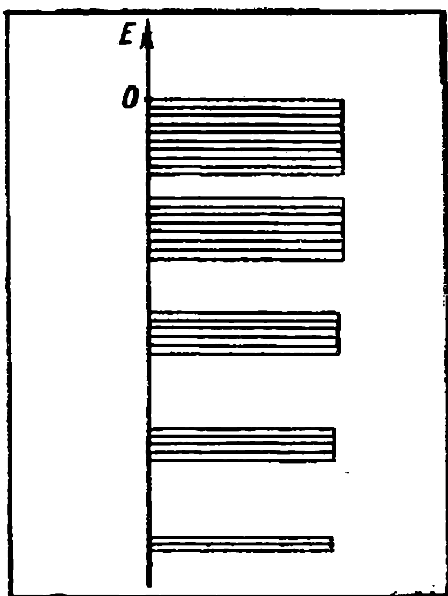
Suartėjant kiekvienas atomas — jo elektronai, branduolys — patiria kito atomo elektronų ir branduolio elektrinio lauko poveikio įtaką. Atomams veikiant vienas kitą, vietoj vieno energijos lygio, vienodo dviem izoliuotiems atomams, atsiranda du, artimai išsidėstę, bet nesutampantys lygiai. Tokiais atvejais sakoma, kad *suskyla* elektronų energijos lygiai.

Dviatomės molekulės susidarymas energetiniu požiūriu reiškia, kad kiekvienam abiejų atomų elektronui atsiranda galimybė įgyti dvigubai daugiau energijos reikšmių, negu izoliuotoje būsenoje.

Jei suartės 3, 4, 5 arba apskritai N atomų, tai dėl jų sąveikos vietoj vieno, vienodo visiems N izoliuotiems atomams energijos lygio atsiras 3, 4, 5 arba N artimi, tačiau nesutampantys lygiai. Jie sudaro **leistinų energijos reikšmių energijos juostą arba zoną.**

Taigi leistinų energijos reikšmių zoną sudaro N artimi lygiai; N — bendras kieto kūno atomų skaičius. 1 m^3 kieto kūno turi 10^{28}—10^{29} atomų. Tokios eilės yra ir zonoje esančių lygių skaičius. Kadangi elektronai priklauso visam kristaliniam kūnui, tai galima sakyti, kad energijos zonos apibūdina kūno visų atomų gali-

mas energijos reikšmes, o leistinų energijos reikšmių diagrama vadinama *kietojo kūno energijos spektru* (74 pav.).



74 pav.

Tačiau ne visi lygiai, atitinkantys skirtingas pagrindinio kvantinio skaičiaus *n* reikšmes, suskyla vienodai. Atomams suartėjant, elektriniai laukai pirmiausia paveikia valentinius elektronus, nes jie silpniau už vidinius elektronus susijungę su savų atomų branduoliais. Todėl valentinių elektronų energijos lygiai suskyla, atstumas tarp atomų $\approx 10^{-9}$ m, o susidariusios leistinų energijos reikšmių zonos plotis — maždaug keli elektronvoltai.

Sąveikaujančių atomų elektrinių laukų įtaka vidiniams elektronams labai silpna. Todėl vidinių elektronų energijos būsena praktiškai tokia pati, kaip ir izoliuotuose atomuose. Vidinių elektronų energijos lygiai silpnai suskyla, kai sąveikaujantys atomai yra nutolę atstumu, mažesniu už kristalinės gardelės periodą (10^{-10} m). Dėl to diagramoje (74 pav.) leistinų energijos reikšmių zonos parodytos skirtingo pločio.

74 paveiksle taip pat matyti, kad kietojo kūno leistinų energijos reikšmių zonos viena nuo kitos atskirtos tarpais — energijos sritimis, kurių elektronai, pagal kvantinės mechanikos dėsnius, negali turėti. Šios sritys vadinamos *draudžiamų energijos reikšmių zonomis*. Draudžiamų zonų plotis savo dydžiu bendramatis leistinų zonų pločiui. Izoliuotų atomų stipriau sužadinti lygiai sudaro platesnes leistinas zonas. Didėjant energijai, leistinų energijos reikšmių zonos plotis didėja, o draudžiamų energijos reikšmių zonų plotis mažėja. Taigi kiekvienam kietajam kūnui yra būdinga elektronų energijos lygių struktūra, arba zoninis energijos spektras.

40. KIETOJO KŪNO ELEKTRONŲ ENERGIJŲ PASISKIRSTYMAS

Nagrinėdami vandenilio atomą, sakėme, kad sužadintoje būsenoje (energijos lygyje $n>1$) elektronas būna neilgai (maždaug 10^{-8} s) ir, išspinduliuodamas energijos perteklių $\Delta E = E_m - E_n$, pereina į normalią, nesužadintą būseną, kuriai būdinga mažiau-

sia iš visų galimų energijos reikšmė. Mažiausios energijos būsena, kaip žinome, yra stabili būsena. Suprantama, kad stengimasis pereiti į energijos požiūriu stabilesnę būseną, t. y. „užimti“ patį žemiausią iš visų galimų energijos lygį, būdingas elektronams ir daugiaelektroniams atomams. Ar tai reiškia, kad visi daugiaelektronio atomo elektronai stabilioje būsenoje turi tą pačią energiją? Į šį klausimą atsako *kvantinės mechanikos pagrindinis dėsnis* — *Paulio principas,* pagal kurį, pačiame žemiausiame energijos lygyje elektronų negali kauptis. Paulio principas teigia, kad **bet kurios viena kitą veikiančių dalelių sistemos toje pačioje energijos būsenoje negali būti daugiau, kaip du elektronai.**

Pagal Paulio principą, elektronai, pradedant pačiu žemiausiu, poromis „užima“ visus energijos lygius. Taigi kiekvienoje sistemoje, turinčioje daug elektronų, kaip ir izoliuotuose daug elektronų turinčiuose atomuose bei kietuose kūnuose, Paulio principas reguliuoja elektronų energijų pasiskirstymą.
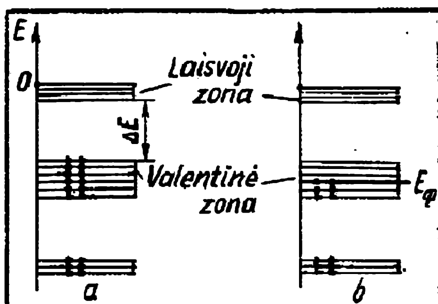
Panagrinėsime kieto kūno elektronų energijų pasiskirstymą. Žinome, kad molekulės susidarymas iš dviejų izoliuotų atomų energijos požiūriu reiškia, kad vietoj izoliuotų atomų vienodų energijos lygių susidaro du gretimi polygiai. Jei izoliuotuose atomuose tam energijos lygiui teko po vieną elektroną, tai, susidarant molekulei, abu elektronai turės mažiausias iš visų galimų energijos reikšmes. Tokiu atveju sakoma, kad elektronai „išsidėsto“ pačiame žemiausiame energijos lygyje, t. y. pagal Paulio principą, jie abu „išsidėsto“ žemiausiame polygyje, o viršutinis polygis lieka „tuščias“. Jei kiekvienas izoliuotas atomas turėtų po du elektronus, atitinkančius tą energijos lygį, tai, susidarant molekulei, šie keturi elektronai „išsidėstytų“ po du abiejuose polygiuose.

Tarkime, kad tam tikrame kiekyje *N* izoliuotų atomų kai kuriuose energijos lygiuose yra 2 *N* elektronų. Tuomet, atomams jungiantis į kristalą, tie 2 *N* elektronų išsidėstys poromis atitinkamos zonos *N* lygiuose. Tačiau elektronai zonas gali užpildyti įvairiai. Apatinės zonos, sudarytos iš izoliuotų atomų pagrindinių (nesužadintų) lygių, aišku, bus užpildytos elektronais visiškai (po du elektronus kiekviename lygyje). Viršutinės zonos susidaro iš izoliuotų atomų sužadintų lygių. Viršutinę zoną, sudarytą iš valentinių elektronų energijos lygių (valentinę zoną) izoliuotame atome, elektronai gali užpildyti visiškai (75 pav., *a*) arba iš dalies (75 pav., *b*). Virš jos esančios zonos elektronų neturi.

Išnagrinėtas elektronų energijų išsidėstymas teisingas tik tuo atveju, kai kietas kūnas yra absoliutinio nulio temperatūroje ir jo neveikia jokios išorinės jėgos.

Kas gi įvyks, jei tokį kietą kūną kaitinsime, apšviesime, švitinsime ultravioletiniais, Rentgeno spinduliais arba paprasčiausiai jo viduje sudarysime elektrinį lauką? Kadangi tuo atveju kristalas gauna išorinės energijos, tai ir elektronų energija turi padidėti. Kvantinės mechanikos požiūriu tai reiškia, kad elektronams

atsirado galimybė pereiti į naują būseną, atitinkančią aukštesnį energijos lygį. Tai įvyksta, kai kietas kūnas gauna išorinės energijos porciją, kurios užtenka elektronams pereiti į vieną iš sužadintų energijos lygių.



75 pav.

Tokia galimybė pirmiausia atsiranda valentinės zonos elektronams, nes elektronams pereiti iš visiškai užpildytų zonų, esančių žemiau už valentines zonas, reikia labai didelės sužadinimo energijos. Vadinasi, kietųjų kūnų visuose energijos procesuose pagrindinį vaidmenį atlieka išoriniai valentiniai elektronai arba zoninės teorijos požiūriu procesai, vykstantys valentinėje ir laisvojoje zonose. Todėl visada zoninėje diagramoje vaizduojamos tik valentinės ir laisvosios zonos.

Nesunku parodyti (padarykite tai savarankiškai), kad, kristalą šildant iki kambario temperatūros arba veikiant srovės šaltinio elektriniu lauku, elektronas gauna energijos, kurios pakanka jam pereiti zonos viduje (elektronui pereiti zonos viduje iš vieno lygio į kitą reikia energijos, lygios kaimyninių lygių energijų skirtumui — maždaug 10^{-22} eV).

25 užduotis. Paruoškite pranešimą apie elektronų energijų išsidėstymą D. Mendelejevo periodinės elementų sistemos cheminių elementų atomuose.

Literatūra. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1974, sk. 73.

41. KIETŲJŲ KŪNŲ ELEKTRINIS LAIDUMAS ZONINĖS TEORIJOS POŽIŪRIU

Kaip jau buvo minėta, zoninė teorija išaiškino daugelį kietuose kūnuose vykstančių reiškinių. Panagrinėsime, kaip zoninė teorija aiškina kristalų elektrinį laidumą.

Kryptingas įelektrintų dalelių judėjimas medžiagoje, veikiamoje elektrinio lauko jėgų, vadinamas elektros srove. Elektrinis laukas veikia elektronus ir laisvo kelio atkarpoje λ juos priverčia judėti su pagreičiu. Tuo atveju elektronai įgyja energiją, lygią elektrinės jėgos E darbui poslinkyje λ. Nesunku apskaičiuoti (žr. VII skyriaus uždavinius), kad ši energija yra 10^{-10} eV eilės. Tai reiškia, kad kristale elektros srovė atsiranda tada, kai viršutinė energijos zona nėra visiškai užpildyta elektronais, t. y. zonoje energijos polygių yra daugiau, negu elektronų (prisiminkime, kad elektronui pereiti zonos viduje užtenka 10^{-22} eV eilės

energijos). Tokia zona vadinama *laidumo zona*. Taigi, kai valentinė zona ne visiškai užpildyta elektronais, kietas kūnas visada praleidžia elektros srovę (75 pav., *b*). Metaluose, esančiuose D. Mendelejevo periodinės sistemos pirmoje grupėje, kaip tik ir yra taip užpildyta valentinė zona. Jie turi tik po vieną valentinį elektroną. Kietame kūne, kuris turi N tokių atomų, yra ir N valentinių elektronų. Tačiau kietojo kūno valentinės zonos lygyje būna ir po du elektronus; tada jie užima tik pusę, t. y. tik $N/2$ lygių iš N galimų.

Periodinės sistemos antros grupės metaluose (Be, Cd, Mg, Zn ir kt.) visiškai užpildyta valentinė zona susikerta su kokia nors neužpildyta zona. Šių metalų zoninė diagrama parodyta 76 paveiksle. Tačiau visi ankstesnieji samprotavimai teisingi ir šiuo atveju.

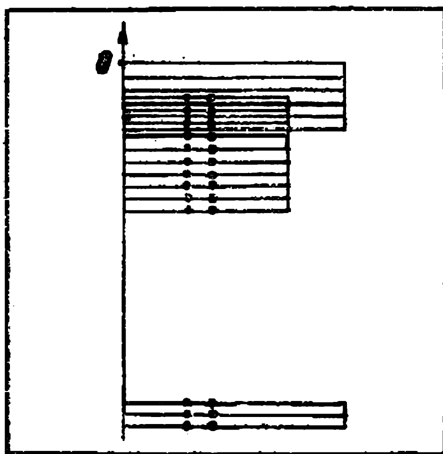
Elektronais užpildytas viršutinis metalo energijos lygis, kai $T=0°K$, vadinamas *Fermio lygiu*. Fermio energija E_F apytiksliai lygi 10 eV. Pagal kvantų teoriją nagrinėjant kietus kūnus, Fermio lygis turi labai didelę reikšmę.

Dabar panagrinėsime kietojo kūno energijos spektrą, parodytą 75 pav., *a*. Iš paveikslo matyti, kad valentinėje zonoje visi energijos lygiai visiškai užpildyti elektronais, o laisvuosius lygius nuo valentinės zonos skiria energijos draudžiamųjų reikšmių zona ΔE. Įprasti elektriniai laukai negali valentinės zonos elektronams suteikti energijos ΔE, kurios jiems užtektų draudžiamajai zonai įveikti bei pereiti į laisvąją zoną ir joje padidinti savo energiją. Taigi, esant nulinei temperatūrai ir nesužadinant, tokiuose kūnuose negali būti elektrinio laidumo. Tačiau realiomis sąlygomis kietojo kūno temperatūra nesiekia nulio, todėl šie kūnai turi šiluminio judėjimo energiją. Yra kristalų, kurių šiluminio judėjimo energijos įprastose temperatūrose nepakanka, kad elektronas galėtų įveikti draudžiamųjų energijos reikšmių zoną ($kT<\Delta E$). Todėl elektriniame lauke net ir aukštoje (tačiau ne per daug aukštoje) temperatūroje tokie kieti kūnai nepraleidžia elektros srovės ir todėl jie vadinami dielektrikais.

Kai kuriuose kristaluose (daugiausia iš centrinės D. Mendelejevo lentelės dalies) draudžiamos zonos plotis (ΔE) palyginti mažas ir šiluminio judėjimo energijos, pasirodo, pakanka daliai elektronų „permesti" iš valentinės zonos į laisvąją ($kt>\Delta E$). Tokiame kietame kūne elektrinis laukas sukelia srovę, t. y. elektronai, patekę į laisvąją zoną, ir valentinės zonos elektronai gali pereiti į aukštesnį neužimtą energijos lygį. Šie kietieji kūnai vadinami puslaidininkiais.

Puslaidininkiuose, skirtingai negu metaluose, srovės nešėjų skaičius priklauso nuo temperatūros. Aukštose temperatūrose puslaidininkių laidumas artimas metalų laidumui, nes, esant didelei šiluminio judėjimo energijai, laisvosios zonos elektronai kartu su valentinės zonos elektronais gali pernešti elektros krūvį. Tačiau puslaidininkiai temperatūroje $T=0°K$ tampa dielektrikais. Todėl

puslaidininkiai užima tarpinę padėtį tarp metalų ir dielektrikų. Tuo ir paaiškinamas jų pavadinimas.



76 pav.

Tačiau reikia pažymėti, kad ir dielektrikai labai aukštose temperatūrose praleidžia elektros srovę. Todėl kietųjų kūnų skirstymas į laidininkus ir dielektrikus yra sąlyginis, tačiau praktiškai, nors ir sąlygiškai, juos galima atskirti pagal draudžiamos zonos plotį. Jei kietojo kūno $\Delta E > 6$ eV, tai jis — dielektrikas, o jei $\Delta E < 6$ eV — puslaidininkis. Kaip rodo teorija ir bandymai, didžiulės puslaidininkių klasės draudžiamos zonos plotis $\Delta E \leqslant 2$ eV.

Puslaidininkiai gali praleisti elektros srovę, veikiami elektromagnetinių spindulių, nes elektromagnetinis spinduliavimas turi pakankamai energijos elektronams permesti iš valentinės zonos į laidumo zoną.

Todėl elektronų būsenos energijos spektro zoniniu pobūdžiu kristaluose galima paaiškinti metalų, puslaidininkių ir dielektrikų bei jų skirtingų elektrinių laidumų egzistavimo faktą: metalų $10^6-10^8 \Omega^{-1}$ m^{-1}, puslaidininkių, 10^6-10^{-8} Ω^{-1} m^{-1}, dielektrikų $10^{-8}-10^{-13}\Omega^{-1}$ m^{-1}.

26 užduotis. 1. Nubraižykite Li, K, Cd, Zn, Te, deimanto, kvarco zonines diagramas.

2. Paruoškite pranešimą apie E. Fermio gyvenimą ir veiklą.

Literatūra. Л я т и л ь П. Энрико Ферми. М., Атомиздат, 1965.

П о н т е к о р в о Б. М., П о к р о в с к и й В. Н. Энрико Ферми в воспоминаниях учеников и друзей. М., «Наука», 1972.

42. PUSLAIDININKIŲ ELEKTRINIS LAIDUMAS

Kaip žinoma, puslaidininkis — tai kietas kūnas, turintis kovalentines jungtis tarp atomų. Absoliutinio nulio temperatūroje visos jungtys tarp atomų yra užpildytos ir medžiagoje nėra krūvių, galinčių judėti, veikiant išoriniam elektriniam laukui. Temperatūrai pakilus, puslaidininkyje atsiranda dviejų tipų krūvių nešėjai: elektronai ir skylutės.

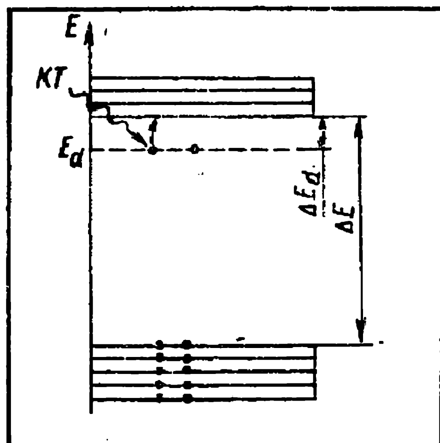
Energijos atžvilgiu panagrinėsime puslaidininkių elektrinį laidumą. Grynas puslaidininkis absoliutinio nulio temperatūroje ir neveikiant išorinėms jėgoms parodytas energijos diagramoje

(žr. § 41); joje valentinė zona visiškai užpildyta, o laisvoje zonoje nėra elektronų. Puslaidininkis panašus į dielektriką. Tokiam puslaidininkiui suteikus išorinę energiją (pavyzdžiui, pakaitinus arba apšvietus), dalis valentinėje zonoje esančių elektronų, gavusių papildomą energiją ΔE, lygią draudžiamųjų reikšmių zonos pločiui, patenka į laisvąją zoną. Laisvojoje zonoje yra daug laisvųjų lygių, todėl laisvieji elektronai, veikiami elektrinio lauko, lengvai keičia savo energiją. Šis laisvųjų elektronų judėjimas ir sudaro puslaidininkiuose elektros srovę. Be to, elektronui išeinant iš valentinės į laisvąją zoną, susidaro sąlygos elektronų poslinkiui pačioje valentinėje zonoje. Todėl atrodo, kad tokioje beveik užpildytoje zonoje judėjimas lygiavertis teigiamo krūvio „tuščių" vietų —„skylučių"— judėjimui. Veikiant elektriniam laukui, „skylučių" energija taip pat keičiasi, ir bendra srovė puslaidininkyje $I = I_{el} + I_{sk}$.

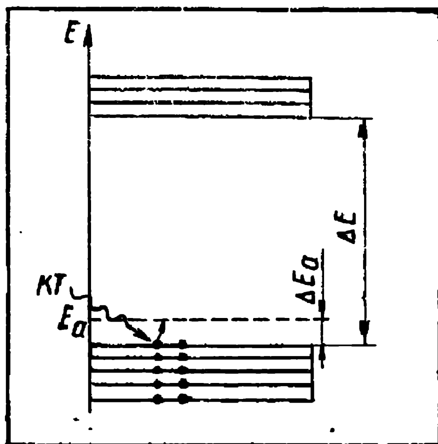
Gryname puslaidininkyje elektronų skaičius lygus skylučių skaičiui, todėl elektrinis laidumas vienodai priklauso ir nuo vienų, ir nuo kitų. Toks puslaidininkių elektrinis laidumas vadinamas *savuoju*.

Visa, kas pasakyta, tinka tik chemiškai gryniems puslaidininkiams. Tačiau daugumai puslaidininkinių įrengimų naudojami puslaidininkiai, kuriuose elektrinį laidumą sudaro priemaišos. Kaip priemaišos naudojami D. Mendelejevo periodinės elementų sistemos III ir V grupės penkiavalenčiai elementai (fosforas, stibis, arsenas), išoriniame sluoksnyje turintys 5 elektronus. Kad susidarytų kovalentinė jungtis su aplinkiniais puslaidininkio, pavyzdžiui, germanio, atomais, reikia keturių elektronų. Lieka vienas elektronas. Šis elektronas silpnai susijęs su savo atomu: elektrono ir patekusio į puslaidininkį priemaišos atomo jono sąveikos jėga pagal Kulono dėsnį sumažėja $\varepsilon = (10 \div 18)$ kartų. Todėl užtenka mažos energijos, kad elektronas atitrūktų nuo atomo ir pereitų į laisvąją būseną. Priemaišos atomas, kai nuo jo atitrūksta elektronas, tampa teigiamu jonu, nors pats puslaidininkis lieka elektriškai neutralus. Kad penktasis elektronas taptų laisvas, reikia daug mažiau energijos, negu laisvajam elektronui pereiti iš valentinės zonos. Tas faktas rodo, kad tokio (dar neatitrūkusio) elektrono energijos lygis E_d yra šiek tiek žemiau už laisvosios zonos „dugno" (77 pav.). Šis lygis E_d apibūdina visus priemaišos atomų „penktuosius" elektronus, nes jų sąlygos yra vienodos (priemaišos atomai išsidėstę vienas nuo kito dideliais atstumais ir dėl to neveikia vieni kitų).

Energijos lygis E_d apibūdina ir silpnai susijusių su priemaišų atomais elektronų energijos būseną, ir pačių priemaišų atomų energijos būseną. Draudžiamųjų reikšmių zonos plotis ΔE_d, kuris skiria lygį E_d nuo laisvosios zonos „dugno", nusako energiją, reikalingą priemaišos atomui sužadinti ir paversti teigiamu jonu. Tokio priemaišos jono teigiamasis krūvis — „susietas" krūvis, jis negali iš vieno priemaišos atomo persikelti į kitą.



77 pav.



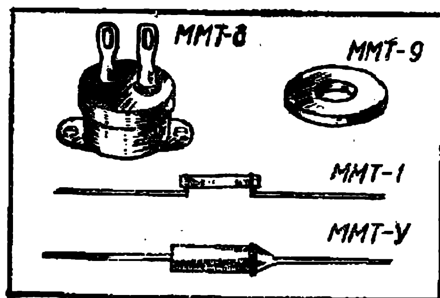
78 pav.

Didinant germanio kristalo su penkiavalente priemaiša temperatūrą nuo absoliutinio nulio, pirmiausia į laisvąją zoną ims pereiti elektronai iš priemaišų lygio, nes $\Delta E_d \ll \Delta E$. Jie pereiti pradės jau temperatūroje $T=5°K$, nes $\Delta E_d=0{,}01$ eV. Ir tik aukštesnėje temperatūroje elektronai iš valentinės zonos pereis į laisvąją. Aišku, kad tokiomis sąlygomis valentinėje zonoje laisvųjų elektronų visada bus daugiau, negu „skylučių", susidariusių, kai kuriems elektronams išėjus iš valentinės zonos į laidumo zoną.

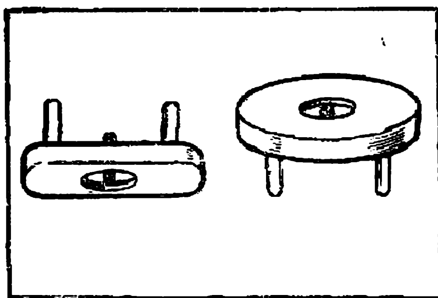
Jei tokiame priemaišiniame puslaidininkyje sudarysime elektrinį lauką, tai elektrinį laidumą daugiausia nulems laisvieji elektronai. Vadinasi, penkiavalentė priemaiša yra laisvųjų elektronų tiekėjas, todėl jie vadinami *donorais,* o puslaidininkiai, turintys tokių priemaišų — *n tipo puslaidininkiais.*

Periodinės sistemos III grupės elementų (boro, galio, indžio) atomai turi tik tris valentinius elektronus, kurie su trimis germanio atomais sudaro porinę elektroninę jungtį. Viena elektroninė jungtis su ketvirtuoju germanio atomu lieka neužpildyta. Ši jungtis būtų užpildyta, jei germanio atomo elektronai gautų mažą sužadinimo energiją (daug mažesnę, kurios jiems reikia visiškai atitrūkti ir virsti laisvaisiais elektronais). Prisijungęs elektroną, priemaišos atomas tampa neigiamu jonu. Tuo atveju iš germanio atomo išlėkusio elektrono vietoje atsiranda skylutė.

Nagrinėjant tokį puslaidininkį energijos atžvilgiu, galima pamatyti, kad energijos lygis, apibūdinantis trivalentės priemaišos visų atomų energijos būseną, yra šiek tiek aukščiau valentinės zonos „lubų", nes priemaišos atomai paima sužadintų elektronų iš valentinės (susietos) būsenos, o energijos lygis ir buvo apibūdinamas elektronų paėmimu, norint užpildyti jungtį. ΔE_a— plotis zonos, skiriančios priemaišos lygį E_a nuo valentinės zonos (78 pav.). Tuo atveju $\Delta E_a \ll \Delta E$. Keliant temperatūrą (nuo



79 pav.



80 pav.

$T=0°K$), elektronai pirmiausia pradės pereiti iš valentinės zonos į priemaišų lygį E_a (germanio $\Delta E_a=0{,}01$ eV). Aukštesnėje temperatūroje elektronai ims pereidinėti iš valentinės zonos į laisvąją. Dėl to aišku, kad bet kurioje temperatūroje valentinės zonos skylučių skaičius visuomet bus didesnis už laisvosios zonos elektronų skaičių. Tokiame puslaidininkyje sukūrus elektrinį lauką, elektrinis laidumas daugiausia priklausys nuo valentinės zonos skylučių.

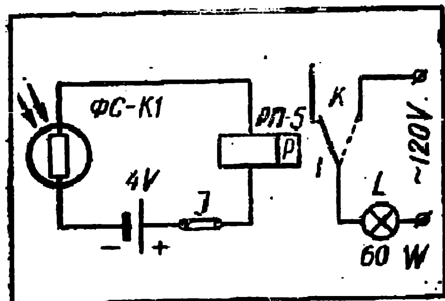
Trivalentės priemaišos paima (akceptuoja) elektronus, todėl jos vadinamos *akceptoriais,* o puslaidininkiai, turintys tokių priemaišų — *p tipo puslaidininkiais.*

Išnagrinėjome puslaidininkių elektrinį laidumą. Dar kartą prisiminkime tas būdingas savybes, dėl kurių jie daug kur pritaikomi praktikoje.

1. Puslaidininkius veikiant išorine energija, didesne kaip draudžiamųjų reikšmių zonos plotis, juose galima reguliuoti laisvųjų srovės nešėjų koncentraciją. Šiuo metu plačiausiai pritaikomas puslaidininkis yra germanis ($\Delta E=0{,}67$ eV) ir silicis ($\Delta E=1{,}1$ eV).

2. Gryno puslaidininkio atomus pakeičiant priemaišų atomais, sąmoningai galima gauti arba *p* tipo, arba *n* tipo puslaidininkius. Kuo didesnis priemaišų atomų skaičius, tuo didesnį galima gauti pagrindinių srovės nešėjų skaičių.

Puslaidininkius kaitinant, didėja laisvųjų srovės nešėjų koncentracija, todėl iš jų gaminamos puslaidininkių šiluminės varžos (termistoriai). Jos plačiai naudojamos temperatūros matavimui, signalizacijai ir automatiniam reguliavimui.



81 pav.

Šiluminės varžos gaminamos iš įvairių metalų (vario, mangano, cinko, kobalto, titano, nikelio ir kt.) oksidų, kurių varža jautri temperatūros pakitimui. Pramonė gamina įvairių tipų ir konstrukcinių formų šilumines varžas, turinčias įvai-

rias elektrines charakteristikas (79 pav.). Kiekvienas tipas skirtas konkretiems techniškiems uždaviniams spręsti.

Laisvųjų srovės nešėjų koncentracijos didinimas, puslaidininkius apšviečiant, panaudojamas, gaminant fotovaržas (fotorezistorius). Fotorezistoriai gaminami iš labai jautrių šviesai medžiagų: kadmio sulfito, galio sulfito, bismuto sulfito. Bendras rezistorių vaizdas pateiktas 80 paveiksle.

Fotorezistoriai sėkmingai naudojami automatikoje: skaičiuojant ir rūšiuojant pagal matmenis ir spalvas gatavus gaminius, įrengiant signalizaciją skysčio lygiui nustatyti ir t. t. Visuose įrenginiuose pagrindinė dalis yra fotorelė, kurios sudėtinė dalis — fotorezistorius.

81 paveiksle parodyta fotorelės schema, kuri įjungia signalinę lempą. Kol fotorezistorius ФС — Kl neapšviestas, elektromagneto apvijomis tekanti srovė yra maža ir elektromagnetas *P* nepritraukia inkaro *I*, darbinis grandinės kontaktas *K* sujungtas, lempa dega. Apšvietus fotorezistorių ФС—Kl, jo varža sumažėja, dėl to padidėja srovė apvijose ir elektromagnetas *P* pritraukia inkarą, kontaktas *K* atsijungia ir signalinė lempa gęsta.

27 užduotis. 1. Pasiūlykite variantą schemos, kuria iš vieno stebėjimo punkto būtų galima matuoti bet kokio objektų skaičiaus temperatūrą.

2. Pasiūlykite relės su termistoriumi schemos variantą, kuriuo galima palaikyti objekto pastovią temperatūrą.

3. Pasiūlykite prietaiso su fotorele schemą, kuriuo galima skaičiuoti ir rūšiuoti gaminius.

4. Pasiūlykite prietaiso su fotorele schemą, kuris padėtų stebėti skysčio arba birių medžiagų lygio kitimą.

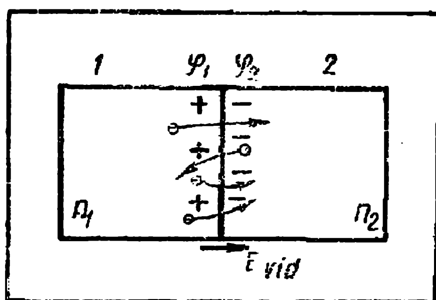
5. Kaip fotorele galima kontroliuoti vandens skaidrumą arba tirpalo koncentraciją?

6. Apipavidalinkite stendą „Šiluminių rezistorių ir fotorezistorių pritaikymas".

43. KONTAKTINIAI REIŠKINIAI

Iki šiol nagrinėjome elektrinius reiškinius, vykstančius vienarūšiame metaliniame laidininke arba tam tikro tipo puslaidininkyje. Pagal elektronų teoriją, du skirtingi metalai skiriasi vienas nuo kito elektronų koncentracija ir išsilaisvinimo darbu ($A_{iš}$), o įvairių tipų puslaidininkiai dar ir pagrindiniais srovės nešėjais. Remiantis zonine teorija, galima sakyti, kad du įvairių rūšių metalai vienas nuo kito skiriasi Fermio energija — viršutiniu, elektronais užpildytu lygiu.

Kas įvyktų, suartinus atominiu atstumu du skirtingus metalus arba skirtingo laidumo tipo puslaidininkius, arba metalą ir puslaidininkį (pavyzdžiui, lydant arba kokiu nors kitu būdu)? Paaiškėjo, kad tuo atveju įvyksta labai įdomūs reiškiniai, kurie buvo pavadinti kontaktiniais. Kontaktinių reiškinių „mechanizmą" geriausiai išaiškina elektronų teorija.



82 pav.

Liečiantis dviem metalams, dėl šiluminio judėjimo elektronai pradės skverbtis pro metalus skiriančią ribą, nes jie turi energijos, kad išlėktų iš metalo. Kuo mažesnis išsilaisvinimo darbas, tuo daugiau bus tokių elektronų. Tarkime, kad metalo *1* išsilaisvinimo darbas mažesnis už metalo *2* išsilaisvinimo darbą. Tuo atveju iš pirmojo metalo į antrąjį metalą pereis daugiau elektronų, negu iš antrojo į pirmąjį. Dėl šio nevienodo elektronų judėjimo priešingomis kryptimis metale *2*, prie kontakto atsiranda neigiamo krūvio perteklius, o metale *1*, iš kurio išėjo daugiau, negu į jį atėjo elektronų,— atsiranda teigiamo krūvio perteklius (82 pav.). Taigi, **liečiantis dviem metalams, atsiranda dvigubas įelektrintas sluoksnis.**

Atsiradus dvigubam įelektrintam sluoksniui, elektronų judėjimo pro metalų ribą sąlygos pasikeičia. Dabar elektronai juda vidiniame elektriniame lauke, kurio elektrinės jėgos trukdo elektronams pereiti iš metalo *1* į metalą *2* ir „padeda" elektronams, pereinantiems iš metalo *2* į metalą *1*. Taip tęsiasi tol, kol nusistovi „dinaminė pusiausvyra"— nepertraukiamas elektronų judėjimas iš vieno metalo į kitą pakeičia atsiradusį tarp metalų kontaktinį potencialų skirtumą $\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2$.

Liečiantis dviem skirtingo tipo laidumo puslaidininkiams, dėl šiluminio judėjimo elektronai iš *n* tipo puslaidininkio difunduoja į *p* tipo puslaidininkį. Elektronas, susitikęs su skylute, ją panaikina, t. y. susitikdami elektronai *rekombinuoja* su skylutėmis. Dėl to priemaišos atomai tampa neigiamais jonais. Ploname *p* tipo puslaidininkio sluoksnyje prie kontakto atsiranda neigiamo krūvio perteklius. Vykstant šiluminiam judėjimui, *p* tipo puslaidininkio skylutės taip pat difunduoja į *n* tipo puslaidininkį, kuriame iš dalies rekombinuoja su elektronais. Dėl to *n* tipo puslaidininkio ploname sluoksnyje atsiranda teigiamo krūvio perteklius.

Kontakto vietoje atsiradęs dvigubas elektrinis sluoksnis (kontaktinis sluoksnis) sukuria elektrinį lauką, kurio stiprumas E_{vid}. Šis laukas trukdo pagrindiniams krūvio nešėjams judėti iš vieno puslaidininkio į kitą. Kontaktiniame sluoksnyje mažai srovės nešėjų, todėl jos turi didelę elektrinę varžą ir trukdo elektros srovei tekėti pro puslaidininkių kontaktą. Dėl to dvigubas kontaktinis sluoksnis dar vadinamas *užtveriamuoju*. Skirtingų tipų dviejų puslaidininkių kontaktas taip pat vadinamas *p—n* perėjimu.

Kodėl atsiranda kontaktinis potencialų skirtumas, gali paaiškinti kvantų teorija. Tačiau kvantų vaizdinių itin reikia teorininiose skaičiavimuose, kurių rezultatai visiškai sutampa su eksperimentinėmis išvadomis.

28 užduotis. 1. Elektronų teorijos požiūriu paaiškinkite, kodėl metalo—puslaidininkio riboje atsiranda kontaktinis potencialų skirtumas.

2. Paaiškinkite, kaip pakinta elektronų energija, liečiantis: a) dviem metalams, b) dviem puslaidininkiams, c) metalui ir puslaidininkiui.

Literatūra. Зильберман Г. Е. Электричество и магнетизм. М., «Наука», 1970, sk. 6.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1974, sk. 78.

44. TERMOELEKTRINIAI REIŠKINIAI

Deja, dviejų metalų kontaktas, kurio potencialų skirtumas $\Delta\varphi$, negali būti energijos šaltiniu ne dėl to, kad $\Delta\varphi$ mažas (skirtingų metalų porų $\Delta\varphi$ siekia nuo dešimtųjų dalių iki vieno volto), o todėl, kad, **esant pastoviai temperatūrai, iš skirtingų metalų sudarytoje uždaroje grandinėje visų kontaktinių potencialų skirtumų suma yra lygi nuliui** (pabandykite savarankiškai gauti atitinkamą išvadą).

Atkreipkite dėmesį, kad ši suformuluota išvada teisinga tik tada, kai besiliečiančių metalų temperatūros vienodos.

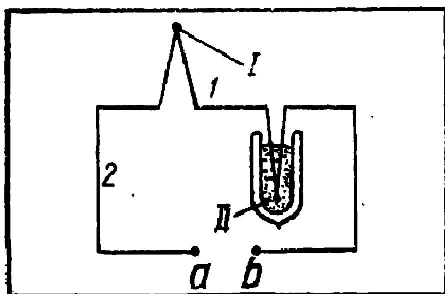
Tačiau, jei sudarytame iš dviejų metalinių laidininkų uždarame kontūre kontaktai turės skirtingas temperatūras, tai kontaktinių potencialų skirtumų suma nebus lygi nuliui. Tai reiškia, kad kontūre veiks elektrovaros jėga, vadinama *termoelektrovaros jėga,* o uždarame kontūre atsiras elektros srovė, vadinama *termoelektros srove.*

Termoelektrovaros jėga $\mathcal{E}$ proporcinga kontaktų (suvirinimo vietų) temperatūrų skirtumui

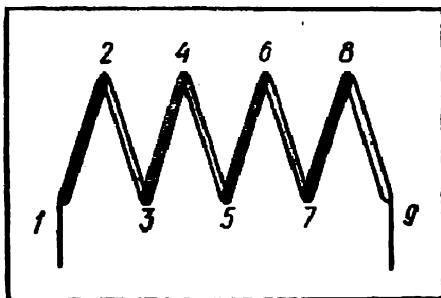
$$\mathcal{E}=\alpha(T_1-T_2).$$

Termoelektros reiškinį atrado maždaug prieš 150 metų olandų fizikas Zebekas. Jis seniai naudojamas laboratorinėje technikoje ir temperatūrų matavimui. Principinė termoelektrinio termometro schema parodyta 83 paveiksle. *Termoporą* sudarantys metalai *1* ir *2* parenkami tokie, kad jos jautrumas būtų kuo didesnis. Viena suvirinta vieta laikoma aplinkoje, kurios temperatūrą reikia išmatuoti, o antro sujungimo temperatūra palaikoma pastovi. Apytiksliai matuojant, antrasis sujungimas laikomas ore. Tiksliai matuojant, jis panardinamas į Diuaro indą, pripildytą skysto azoto arba tirpstančio ledo. Prie gnybtų *ab* prijungiamas jautrus galvanometras. Termopora galima matuoti ir labai aukštas, ir labai žemas temperatūras, kurių negalima išmatuoti paprastu skysčio termometru.

Jautrumui padidinti vietoj vienos termoporos nuosekliai sujungiamos kelios termoporos. Baterijos (termostulpelio) EVJ lygi atskirų termoporų EVJ sumai. Termostulpeliai (85 paveiksle parodytas mokykliniams fizikos bandymams naudojamas termostul-



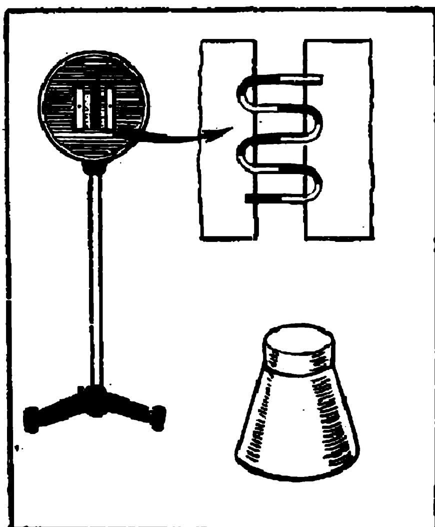
83 pav.



84 pav.

pelis) montuojami taip, kad visi neporiniai sujungimai būtų įtvirtinti rėmelyje, o visi poriniai — rėmelio viduje. Rėmelis su termobaterija įdedamas į uždarą metalinį gaubtą, kuriame yra mažas langelis. Pro langelį krinta spinduliai ir įkaitina porinius termoporos sujungimus. Tokį stulpelį prijungus prie projekcinio galvanometro, galima įsitikinti, kad jis reaguoja į žmogaus rankos, nutolusios nuo jo kelis metrus, šiluminį spinduliavimą. Toks spinduliavimas sukelia sujungimų temperatūrų skirtumą tik apie milijoninę laipsnio dalį.

Termoelementu galima paversti elektros energija šilumą, kuri kaitina karštąjį kontaktą. Tačiau šiuo atveju tik maža šilumos dalis virsta elektros energija, nes didžioji šilumos dalis atiduodama šaltąjį kontaktą supančiai aplinkai ir prarandama dėl gero metalų šiluminio laidumo. Kadangi metaluose laisvųjų elektronų skaičius ir jų energija praktiškai nepriklauso nuo temperatūros, tai tokių elementų termoelektrovaros jėga maža (apie 10 μ V vienam laipsniui). Tokių elementų n. k. nėra didesnis kaip 0,5%. Todėl jie nenaudojami elektros energijai gauti.

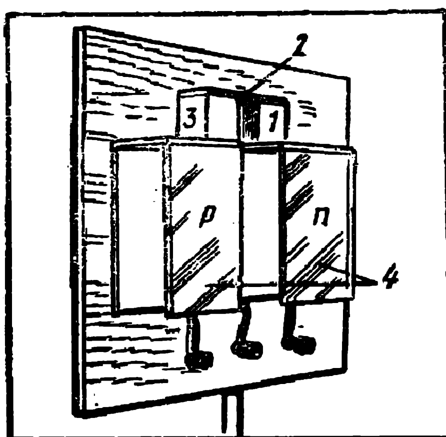

85 pav.

Šio amžiaus ketvirtojo dešimtmečio pradžioje buvo sukurtas termoelementas, kurį sudarė specialiai parinktas puslaidininkis, turintis kontaktą su metalu. Šio elemento termoelektrovaros jėga didesnė už dviejų metalų kontakto EVJ (1000 μ V vienam laipsniui), jo n. k. taip pat didesnis (7—8%).

Vėliau, panaudojant du puslaidininkius, buvo kuriami termoelementai, turintys didesnį n. k. Idėją kurti puslaidininkių

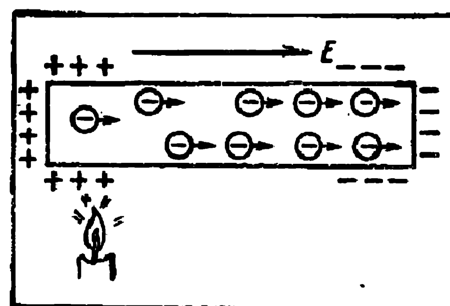
termoelementus pasiūlė tarybinis fizikas akademikas A. Jofė.

Puslaidininkių termoelementas gali būti įrengtas taip, kaip parodyta 86 paveiksle: viršutiniai dviejų skirtingų laidumo tipų puslaidininkių sijelių galai *1* ir *3* sujungti varine plokštele *2*. Radiatoriaus П formos plieninės plokštelės *4* yra skirtos šilumai nuvesti ir elemento darbo metu reikalingam temperatūrų skirtumui palaikyti. Puslaidininkio karštus kontaktus jungianti varinė plokštelė *2* neturi įtakos tokio termoelemento EVJ didumui, nes abu jos galai yra toje pačioje temperatūroje.



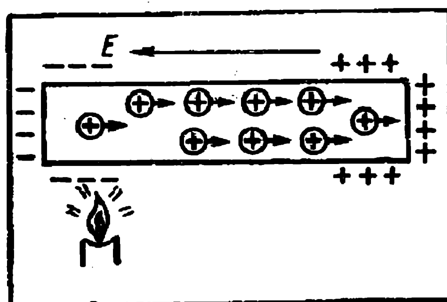
86 pav.

Puslaidininkių termoelementų termoelektrovaros jėga didesnė už metalinių termoporų ne tik dėl to, kad puslaidininkiai mažiau laidūs šilumai. Pagrindinė priežastis yra ta, kad kaitinamuose puslaidininkiuose padidėja ne tik elektronų ir skylučių kinetinė energija, bet ir jų koncentracija.

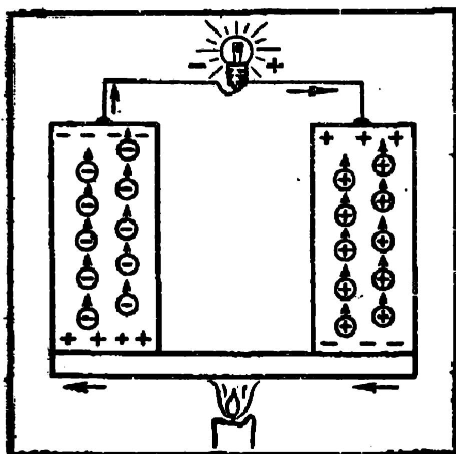


87 pav.

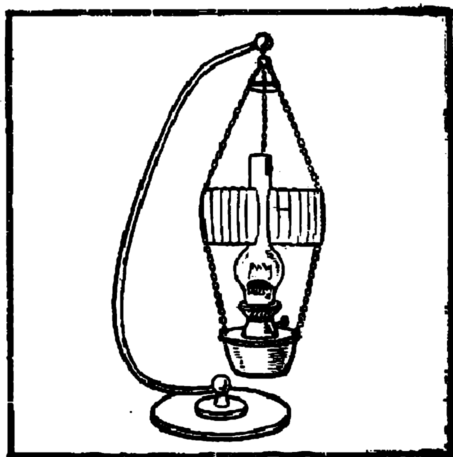
Padidėjus pagrindinių srovės nešėjų — elektronų *n* tipo puslaidininkiuose (87 pav.) ir skylučių *p* tipo puslaidininkiuose (88 pav.) koncentracijai ir jų judėjimo energijai, pasikeičia puslaidininkio viduje krūvių pasiskirstymas: pagrindiniai srovės nešėjai „juda" į šaltąjį galą, „apnuogindami" priemaišos jonus. Taip pasiskirsčius krūviams, sukuriamas vidinis elektrinis laukas, kuris didėdamas sulėtina krūvių judėjimą iš šiltesnio galo į šaltesnį. Dėl šio lauko ir atitinkamo temperatūrų skirtumo bendro veikimo nusistovi pusiausvyra, apibūdinama tam tikru potencialų skir-



88 pav.



89 pav.



90 pav.

tumu tarp puslaidininkio šaltojo ir įkaitinto galo. Tokį puslaidininkį įjungus į uždarą grandinę, joje atsiranda srovė.

Todėl puslaidininkių termoelemente yra dvi šakos — viena elektroninio, kita skylinio puslaidininkio. Juos jungiantis tiltelis kaitinamas (89 pav.). Atsiradusią termoelektrovaros jėgą sudaro dvi dedamosios. Pirmoji atsiranda, pagrindiniams nešėjams pasislinkus iš šiltesnio į šaltesnįjį galą. Šios termoelektrovaros dedamosios didumas lygus abiejų šakų elektrovaros jėgų sumai. Puslaidininkio ir metalo riboje taip pat atsiranda kontaktinis potencialų skirtumas. Jis priklauso nuo srovės nešėjų greičio ir jų koncentracijos abiejose pusėse skirtumo. Algebrinė kontaktų potencialų skirtumų suma ir yra termoelektrovaros jėgos antroji dedamoji.

TSRS MA Puslaidininkių institute sukurti puslaidininkiniai termogeneratoriai, kurių n. k. yra maždaug 15%.

Tarybų Sąjungoje pirmą kartą buvo pradėti naudoti termogeneratoriai praktiškiems tikslams. Partizanai termogeneratorius naudojo Didžiajame Tėvynės kare, juos pritaikė kaimo rajonų radiofikavimui. Termogeneratoriai yra maži, paprastos konstrukcijos, palyginti patvarūs. 90 paveiksle parodytas termogeneratorius ТГК-3 (trijų vatų žibalinis termoelektrinis generatorius). Vidiniai generatoriaus kontaktai išdėstyti apskritimu apie kaitintuvą ir yra kaitinami degančios žibalinės lempos dujomis. Jie įkaista iki 300—350°C temperatūros. Aušinamų kambario oru išorinių sluoksnių temperatūra pasiekia 60°C. Tokio generatoriaus gaminama EVJ yra apie 100 V.

Tekant srovei grandine, kurią sudaro du sulituoti metalai, pastebimas atvirkščias termoelektriniams reiškiniams efektas, t. y. vieno kontakto temperatūra pakyla, o kito krinta. Šį efektą 1934 m. nustatė prancūzų fizikas Peltje.

Toks reiškinys gali būti panaudotas, kuriant šaldomąsias mašinas.

1930 m. akademikas A. Jofė, panaudojęs puslaidininkinius termoelementus, sukūrė termoelektrinio šaldymo teoriją.

Termobaterijoje keičiant srovės kryptį, galima šaldytuvą paversti generatoriumi. Remiantis Peltje reiškiniu, yra sukurtas patalpų termoelektrinio apšildymo metodas (žr. 3 spalvotą įkliją).

29 užduotis. 1. Paruoškite pranešimą apie Peltje efektą.
2. Paruoškite pranešimą apie termogeneratorių pritaikymo perspektyvas.
3. Paaiškinkite kontaktinius reiškinius šiuolaikinės kvantų teorijos požiūriu.
4. Paruoškite pranešimą apie A. Jofės gyvenimą ir veiklą.

Literatūra. Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, p. 423 (pirmam klausimui), p. 425 (trečiam klausimui).

Борисов Е., Пятнова И. Ключ к Солнцу. Рассказы о полупроводниках. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1964 (antram klausimui).

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1974.

Ливанова А. М. Физики о физиках. М., «Молодая гвардия», 1968, p. 97—130 (ketvirtam klausimui).

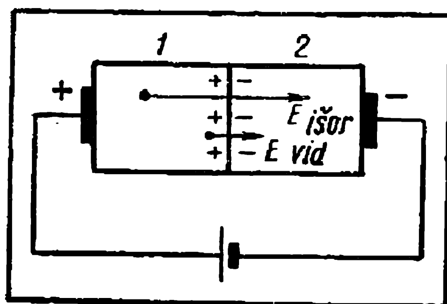
Иоффе А. Ф. Встречи с физиками. Мои воспоминания о зарубежных физиках. М., Физматгиз, 1962 (ketvirtam klausimui).

45. KONTAKTO VARŽOS PRIKLAUSOMYBĖ NUO IŠORINĖS ĮTAMPOS

Dvigubas elektrinis sluoksnis, atsirandąs išilgai dviejų metalų, dviejų puslaidininkių arba metalo ir puslaidininkio lietimosi paviršiaus, gali keisti elektrinę varžą priklausomai nuo išorinio srovės šaltinio elektrinio lauko krypties.

Dviejų metalų *1* ir *2* kontaktą (91 pav.) prijunkime prie nuolatinės srovės šaltinio. Prie metalo *1* prijungus srovės šaltinio teigiamą polių, o prie metalo *2* — neigiamą, srovės šaltinio elektrinio lauko kryptis (ji vadinama išoriniu elektriniu lauku) ir kryptis vidinio elektrinio lauko dvigubame elektriniame sluoksnyje bus vienoda. Suminis elektrinis laukas dar labiau trukdys elektronų judėjimui kontaktiniame sluoksnyje. Dvigubo sluoksnio storis ir kontaktinis potencialų skirtumas padidės. Galima sakyti, kad kontaktinio sluoksnio varža padidėjo, nes srovė grandinėje sumažėjo.

Prie metalo *2* prijungus srovės šaltinio teigiamą polių, o prie metalo *1* — neigiamą polių, išorinio elektrinio lauko kryptis tampa priešinga kontaktinio sluoksnio elektrinio lauko krypčiai. Suminis elektrinis laukas, kurio stiprumas $E = E_{išor.} - E_{vid.}$, mažiau trukdys elektronų judėjimui ir elektronai iš metalo *1* į metalą *2* judės aktyviau. Dvigubas elektrinio sluoksnio storis ir kontaktinis potencialų skirtumas sumažėja — lygiagrečiai sumažėja ir kontakto elektrinė varža.



91 pav.

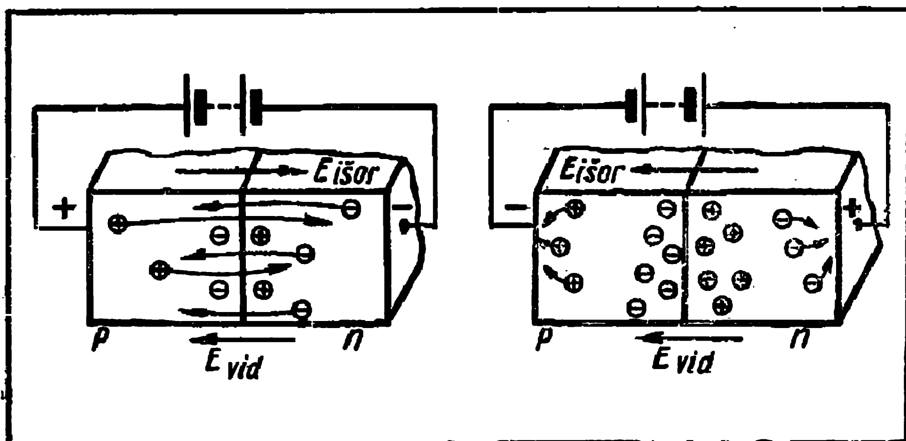
Prijungtoji išorinio srovės šaltinio įtampa vadinama *tiesioginė*, kai ji sumažina kontakto varžą, ir *atbulinė*, kai ji padidina kontakto varžą.

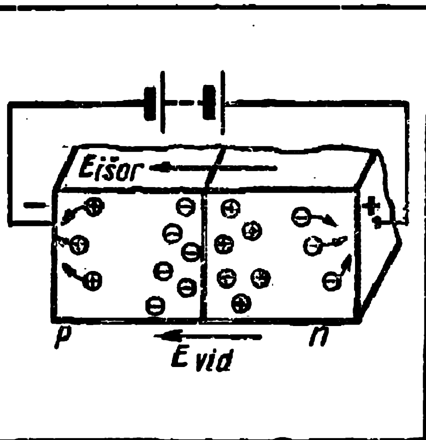
Tačiau liečiantis dviem metalams ir prijungus tiesioginę bei atbulinę įtampą, elektronų koncentracija pakinta mažai. Juk elektronų koncentracija metaluose didžiulė — 10^{28} m^{-3}. Todėl dvigubo elektrinio sluoksnio varžos priklausomybė nuo prijungtos įtampos itin aiškiai pastebima, liečiantis dviem skirtingo laidumo puslaidininkiams.

Išorinį elektrinį lauką nukreipus prieš vidinį, to lauko jėgų veikiami pagrindiniai krūvių nešėjai susitelks prie *p—n* perėjimo, įsiskverbs į jį ir jį prisotins (92 pav.). Dėl to *p—n* perėjimo varža sumažėja. Grandinėje atsiranda pagrindinių srovės nešėjų sukurta stipri srovė.

Prie *p—n* perėjimo prijungus išorinę įtampą taip, kad srovės šaltinio sukurtas elektrinis laukas bus nukreiptas į tą pačią pusę, kaip ir dvigubo sluoksnio laukas, dalis pagrindinių srovės nešėjų, to lauko jėgų veikiami, išeis iš srities prie kontaktų į atitinkamus polius ir ten neutralizuosis (93 pav.). Dėl to srityje prie kontaktų dar labiau sumažės pagrindinių srovės nešėjų, o tai reiškia, kad *p—n* perėjimo varža ryškiai padidėja. Ši srovė visoje grandinėje bus labai maža, nes ją nulemia tik nepagrindiniai srovės nešėjai, kurių palyginti su pagrindiniais yra nedaug.

Grandinėje, turinčioje *p—n* perėjimą, srovės priklausomybė

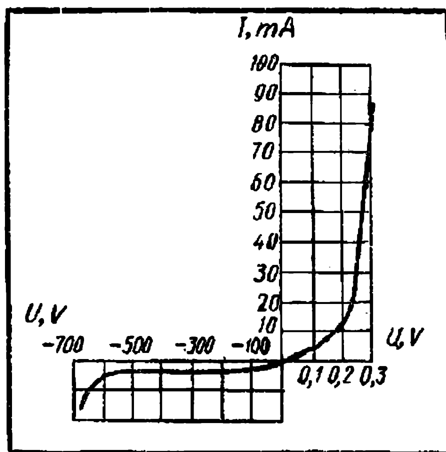




92 pav.

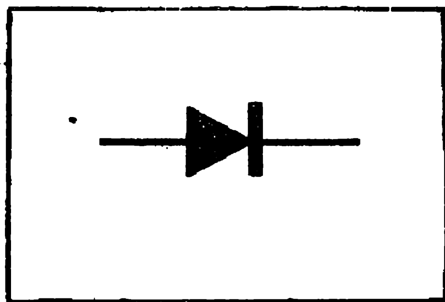
93 pav.

nuo srovės šaltinio įtampos (voltamperinė charakteristika) parodyta 94 paveiksle. Esant tiesioginei įtampai, srovės stiprumas, pradedant tam tikra reikšme, kinta priklausomai nuo įtampos beveik pagal tiesinę priklausomybę. Vadinasi, *p—n* perėjimo varža iš pradžių palaipsniui mažėja, o vėliau lieka beveik pastovi. Esant atbulinei įtampai, kai kuriose dalyse srovė beveik nepriklauso nuo prijungtos įtampos. Tai rodo, kad *p—n* perėjimo varža didėja proporcingai prijungtai įtampai. Nepagrindinių srovės nešėjų sukurta atbulinė srovė nestipri: ji bus tuo mažesnė, kuo mažiau puslaidininkyje nepagrindinių srovės nešėjų.



94 pav.

Esant didelėms, kelių šimtų voltų eilės, atbulinėms įtampoms, srovė staiga sustiprėja, pramušamas *p—n* perėjimas. Užtveriamojo sluoksnio storis labai mažas (10^{-5} cm), o jame lauko įtampa pasiekia tūkstančius voltų į vieną metrą. Toks stiprus laukas gali išlaisvinti sujungtus elektronus, — juos išplėšti iš kristalinės gardelės, o dėl to staiga padidėja nepagrindinių srovės nešėjų. Užtveriamasis sluoksnis suyra ir atbulinė srovė staiga padidėja.



95 pav.

46. PUSLAIDININKINIAI PRIETAISAI PAGAL *p—n* PERĖJIMO SCHEMĄ

1. Puslaidininkiniai diodai. Matėme, kad viena išorinio lauko kryptimi *p—n* perėjimo varža didelė ir staigiai sumažėja, pakitus lauko krypčiai. Galima sakyti, kad *p—n* perėjimas turi vienpusį laidumą.

Ši puslaidininkių savybė plačiai pritaikyta prietaisuose, vadinamuose puslaidininkiniais diodais. Jie naudojami kintamajai srovei lyginti. Yra daug skirtingų tipų puslaidininkinių lygintuvų. Žemo dažnumo stiprios srovės išlyginamos seleno arba vienvalenčio vario oksido plokštiniais lygintuvais. Aukšto dažnumo sro-

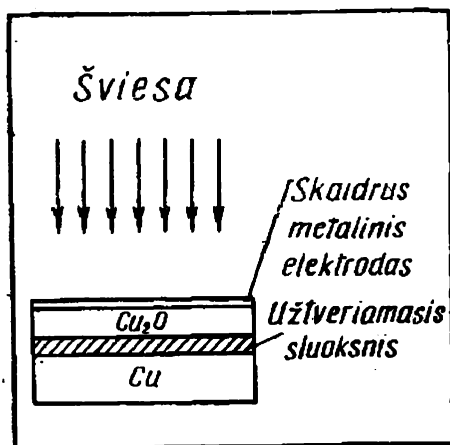
vės išlyginamos silicio arba germanio puslaidininkiniais lygintuvais, vadinamais kristaliniais diodais. Kristaliniais diodais galima išlyginti iki 10^{10} Hz dažnumo sroves, kurių negalima išlyginti elektroninėmis lempomis (žr. 3 spalvotą įkliją).

Kaip puslaidininkiniai diodai vaizduojami radiotechnikos schemose, parodyta 95 paveiksle.

Kuo mažesnė atbulinė srovė, tuo geresnės puslaidininkinių diodų savybės. Nepagrindinių srovės nešėjų koncentracija priklauso nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, ji didėja, taigi didėja ir atbulinė srovė. Todėl puslaidininkiniai diodai turi didelį trūkumą — aukštesnėje temperatūroje pablogėja jų lyginimo savybės.

2. Puslaidininkiniai fotoelementai. Tai prietaisai, kurie šviesos energiją tiesiogiai paverčia elektrine. Fotoelementas iš principo panašus į puslaidininkinį diodą: abu prietaisai turi elektroninį-skylinį perėjimą. Kad fotoelemente yra užtveriamasis sluoksnis, galime įsitikinti, užtemdytą fotoelementą jungdami iš pradžių tiesiogine, vėliau atvirkštine kryptimi. Tuo atveju pastebimas ryškus srovės pakitimas grandinėje. Kadangi puslaidininkiniai fotoelementai turi elektroninį-skylinį perėjimą, dažnai jie vadinami ventiliais, arba fotoelementais su užtveriamuoju sluoksniu.

Fotoelementai gaminami, ant metalinės plokštelės (varinės arba geležinės) uždedant puslaidininkio sluoksnį. Iš viršaus puslaidininkis padengiamas plonu pusiau skaidriu elektrodu. Užtveriamasis sluoksnis atsiranda fotoelemento gamybos procese tarp metalo ir puslaidininkio (metalo-puslaidininkio perėjimas), pavyzdžiui, vienvalenčio vario oksido elemento (96 pav.), arba tarp dviejų puslaidininkių, kaip, pavyzdžiui, seleno fotoelemento. Selenas turi skylinį laidumą. Uždedant viršutinį skaidrų elektrodą, dalis uždedamo metalo difunduoja į seleno gilumą ir dėl to seleno dalies laidumas pasidaro elektroninis. Šių dviejų puslaidininkių riboje ir atsiranda sluoksnis, turintis p—n perėjimą.

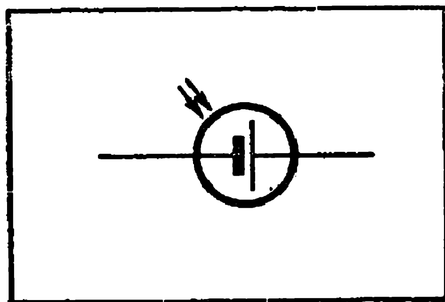


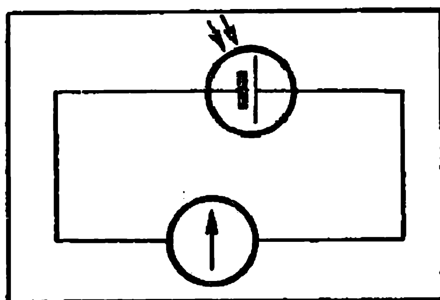
96 pav.

Scheminis fotoelementų žymėjimas parodytas 97 paveiksle.

Sujunkime užtemdytą fotoelementą su galvanometru (98 pav.). Galvanometro rodyklė rodo nulį. Apšvietus fotoelementą dienos šviesa, galvanometras rodo silpną srovę. Sustiprinus fotoelemento apšvietimą, srovė grandinėje padidėja. Bandymas rodo, kad, apšvietus fotoelementą, atsiranda EVJ (fotoelektrovaros jėga).

Aišku, kad, apšvietus fotoelementą, veikiant šviesos energijai, puslaidininkyje atsiranda poros „elektronas-skylutė". Švie-


97 pav.


98 pav.

sos išlaisvinti nepagrindiniai srovės nešėjai (elektronai *p* puslaidininkyje ir skylutės *n* puslaidininkyje) laisvai pasiskirsto po visą puslaidininkio tūrį. Priartėję prie *p—n* perėjimo, jie, veikiami kontaktinio lauko, nukreipto iš elektroninio puslaidininkio į skylinį, pereis iš vieno puslaidininkio į kitą. Tuo atveju elektronai susitelks elektroniniame puslaidininkyje, o skylutės — skyliniame. Dėl to kontaktinio lauko stiprumas sumažėja, o elektronų srautas iš *n* srities ir skylučių srautas iš *p* srities padidėja. Fotoelementą išjungus, elektronų ir skylučių srautai keisis tol, kol tarp elektronų ir skylučių srautų nusistovės dinaminė pusiausvyra. Tuo momentu tarp elektrodų atsiras tam- tikras potencialų skirtumas, kuris ir sukurs fotoelemento EVJ. Tokio fotoelemento EVJ būna 1 volto stiprumo.

Fotoelementas yra vienas iš labiausiai paplitusių prietaisų. Visose fotoelektrinėse schemose taikomos dvi fotoelemento savybės:

1) fotosrovės atsiradimas, bendrai veikiant šviesai;

2) fotosrovės priklausomybė nuo apšviestumo intensyvumo.

Fotoelemento n. k. nedidelis (~1%), tačiau jie sėkmingai naudojami automatikoje, signalizacijoje, televizijoje. Fotoelementai patogūs tuo, kad jiems nereikia papildomo srovės šaltinio, kaip įrengimams su fotovaržomis.

Svarbesnis ir įdomesnis fotoelementų pritaikymas prietaisuose, kurie saulės energiją paverčia elektros energija.

Saulės baterija — tai keletas vienas su kitu sujungtų silicio fotoelementų. Sukurtos įvairios saulės baterijų konstrukcijos, jų n. k. siekia 12—15%, todėl jos naudojamos kaip elektros generatoriai.

Dabar pagrindinės problemos šioje srityje yra fotoelementų n. k. didinimas ir jų gamybos technologijos tobulinimas. Kad įsivaizduotute saulės baterijos galingumą, panagrinėkime tokį pavyzdį. 100×100 km^2 žemės plotą padengus didelio efektyvumo fotoelementais, tokios stoties galingumas būtų lygus visų žemės rutulio elektros stočių galingumui. Šiuo metu saulės baterijos naudojamos ten, kur reikia patikimo, bet nedidelio galingumo

elektros energijos šaltinio, pavyzdžiui, dirbtiniuose Žemės palydovuose (žr. 4 spalvotą įkliją).

1958 m. buvo išrastas dar vienas puslaidininkinis prietaisas, naudojamas kaip srovės šaltinis ir vadinamas atomine baterija. Atominė baterija radioaktyvinio spinduliavimo energiją tiesiogiai paverčia elektros energija.

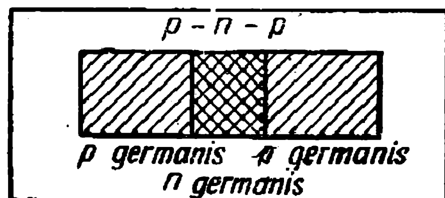
47. *p—n—p* PERĖJIMAS. TRANZISTORIAI

Puslaidininkiniais prietaisais taip pat stiprinama ir generuojama kintamoji srovė bei įtampa. Tokie prietaisai buvo pavadinti *kristaliniais triodais*, arba *tranzistoriais*. Dažniausiai puslaidininkiniuose trioduose naudojamas silicis ir germanis. Juose elektronų laisvasis kelias ilgesnis, negu kituose puslaidininkiuose. Be to, germanio ir silicio kristalai mechaniškai atsparesni ir chemiškai patvaresni. Svarbi šių puslaidininkių savybė yra palyginti lėta elektronų ir skylučių rekombinacija, todėl įkrautos priešingų ženklų elektra dalelės praeina pro kristalų ploną sluoksnį viena su kita nesusijungdamos.

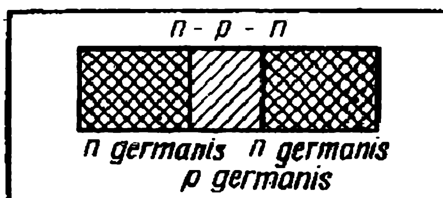
Labiausiai paplitęs tranzistoriaus tipas — vadinamasis *plokštinis triodas*. Gaminant plokštinį triodą, į germanio arba silicio monokristalą įterpiama atitinkama priemaiša taip, kad tarp dviejų elektroninių sluoksnių susidarytų skylinis tarpinis sluoksnis. Priklausomai nuo to, triodai skirstomi *n* puslaidininkių pagrindu (*p—n—p* tipas, 99 pav.) ir triodai *p* puslaidininkių pagrindu (*n—p—n*, 100 pav.).

Sujungus skirtingo laidumo tipo puslaidininkius, skiriamojoje riboje, kaip žinoma (žr. § 45), susidaro sritis, mažai turinti srovės nešėjų (*užtveriamasis sluoksnis*). Plokštinis triodas sudarytas iš trijų puslaidininkių, todėl jame abiejose vidurinio puslaidininkio pusėse susidaro du užtveriamieji sluoksniai. Todėl puslaidininkinis triodas, skirtingai nuo diodo, turi du elektroninius-skylinius perėjimus. Jis yra tarytum du nuosekliai vienas prieš kitą sujungti diodai.

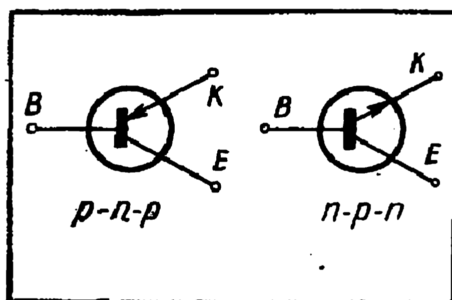
Tačiau tranzistoriaus negalima laikyti paprastu dviejų diodų junginiu. Priežastis ta, kad tranzistoriuje tekanti pro antrąjį perėjimą srovė priklauso nuo srovės, tekančios pro pirmąjį perėjimą, o tuo tarpu dviejuose skirtinguose dioduose, kiekviename iš jų,



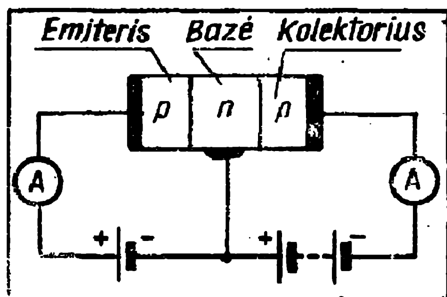
99 pav.



100 pav.



101 pav.



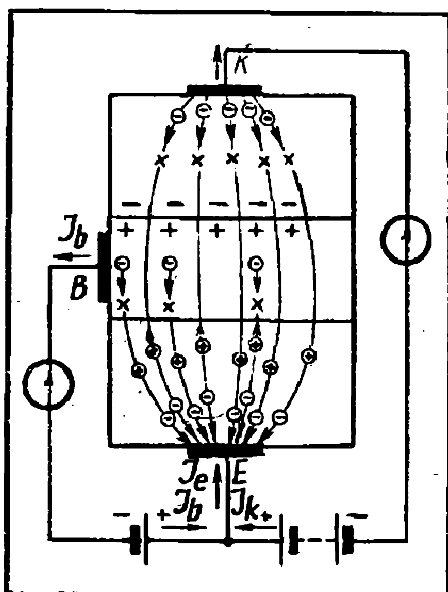
102 pav.

srovė priklauso tik nuo prijungtos įtampos ir jos poliaringumo, o visai nepriklauso nuo antrojo diodo būsenos. Scheminis tranzistorių žymėjimas parodytas 101 paveiksle (žymėjimas K, E ir B bus aiškinamas toliau).

Kad puslaidininkinis triodas pradėtų stiprinti, jį reikia sujungti su dviem išoriniais srovės šaltiniais taip, kad vienas elektroninis-skylinis perėjimas gautų tiesioginę įtampą, o kitas — atbulinę (102 pav.).

Perėjimas, gaunantis tiesioginę įtampą, vadinamas *emiteriniu*, o perėjimas, įjungtas užtveriamąja kryptimi,— *kolektoriniu*. Elektrodai atitinkamai vadinami emiteriu ir kolektoriumi. Elektrodas, sujungtas su viduriniu puslaidininkiu, vadinamas *pagrindu*, arba *baze*.

Panagrinėkime *p—n—p* tipo tranzistoriaus veikimo principą (103 pav.). Gaminant puslaidininkinį triodą, emiteris akceptoriais prisotinamas stipriau, negu bazė donorais, t. y. emiteris turi didesnį laidumą, negu bazė. Kolektorius yra elektrodas, kurio laidumas mažesnis, negu bazės. Į emiterinį perėjimą tiekiama išorinė įtampa praleidžiamąja kryptimi, o į kolektorinį — atbuline kryptimi. Tada grandinėje emiteris—bazė atsiranda elektros srovė. Ši srovė vadinama emiterio srove. Ją daugiausia sudaro skylutės, pereinančios iš emiterio į bazę, ir mažas kiekis elektronų, einančių priešinga kryptimi, t. y. iš ba-



103 pav.

zės į emiterį. Tuo pačiu metu iš emiterio į išorinę grandinę išeina toks pat kiekis elektronų; dėl to emiteryje atsiranda naujos skylutės ir jų skaičius nesumažėja.

Bazėje skylutės juda prie kolektorinio perėjimo. Kadangi germanyje ir silicyje elektronų ir skylučių rekombinacijos greitis mažas, tai skylutės nuotolį tarp emiterio ir kolektoriaus suspėja nueiti praktiškai be rekombinacijos. Kol skylutės pasiekia bazės sritį (tūkstantosios sekundės dalys), dalis jų spėja rekombinuotis su bazės elektronais. Tokiu būdu germanio bazės sluoksnyje (*n* sluoksnyje) srovę sukelia ne pagrindiniai *n* tipo nešėjai, judėdami puslaidininkiu, o emiterio *p* sluoksnio injekuotos skylutės. Bazė yra plona, todėl didžioji skylučių dalis prieina iki kolektorinio perėjimo ir patenka į kolektorinio perėjimo elektrinį lauką. Šis laukas laisvai praleidžia iš bazės ateinančias skylutes. Taigi, veikiamos kolektorinio perėjimo elektrinio lauko, skylutės įtraukiamos į kolektoriaus sritį. Čia skylutės rekombinuoja su laisvaisiais elektronais, atėjusiais iš išorinės grandinės. Šių elektronų judėjimas ir yra kolektoriaus srovė. Dėl skylučių judėjimo pro kolektorinį perėjimą jo varža labai sumažėja. Dėl to srovė padidėja kolektoriaus grandinėje. Kolektoriaus srovės stiprumas šiek tiek mažesnis už emiterio srovės stiprumą, nes dalis skylučių rekombinuoja su bazės elektronais, tačiau kartu žymiai didesnis už bazės srovę. Šias sroves sieja tokia priklausomybė:

$$I_e = I_k + I_b.$$

Puslaidininkiniai triodai yra plačiai taikomi technikoje stiprintuvų ir generatorių schemose (žr. spalvotą įkliją). Mūsų pramonė gamina puslaidininkinius radijo imtuvus ir televizorius.

Puslaidininkiniai prietaisai (diodai ir triodai) turi privalumų palyginus su radijo lempomis: juose nėra kaitinamo katodo, todėl jie naudoja mažesnę energiją, turi didesnį n. k. (iki 50%, vakuuminių lempų jis mažesnis kaip 1%), žemą maitinimo įtampą, mažus matmenis.

Puslaidininkiniams prietaisams nereikia vakuumo, kaip elektroninėms lempoms, todėl jie patikimesni ir patvaresni. Šie prietaisai veikia be inercijos, t. y. nereikia įkaitinimo laiko kaip elektroninėms lempoms — įjungti jie pradeda veikti.

Rimtas puslaidininkinių prietaisų trūkumas yra jų padidintas jautrumas aukštai temperatūrai, todėl neleistinos elektrinės perkrovos, reikia labai atsargiai juos lituoti grandinėse.

Tobulinant puslaidininkinių prietaisų gamybos technologiją, bus įmanoma gauti puslaidininkinius prietaisus su absoliučiai vienodomis charakteristikomis, todėl technikoje, o ypač radiotechnikoje, puslaidininkiniai prietaisai bus plačiau naudojami.

30 užduotis. 1. Kokius pakeitimus reikia padaryti schemose su fotorezistoriais (81 pav.), vietoj rezistorių panaudojus fotoelementus?

2. Paaiškinkite, kodėl vienodo elektroninio ir skylinio (mišraus) laidumo puslaidininkiuose termoelektrovaros jėga maža arba jos visai neatsiranda.

LITERATŪRA VII SKYRIUI

Холден А. Что такое ФТТ. Основы современной физики твердого тела. М., «Мир», 1971.

Рыдник В. И. Что такое квантовая механика. М., «Советская Россия», 1963.

Пономарев Л. И. По ту сторону кванта. М., «Молодая гвардия», 1971.

Блудов М. И. Беседы по физике. Изд. 2-е. Ч. II. М., «Просвещение», 1973.

Анфилов Г. Б. Что такое полупроводник. М., Детгиз, 1957.

Борисов Е., Пятнова И. Ключ к солнцу. Рассказы о полупроводниках. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1964.

VIII SKYRIUS

MEDŽIAGŲ MAGNETINĖS SAVYBĖS

48. ELEMENTARŪS MAGNETIZMO NEŠĖJAI

Iš pagrindinio fizikos kurso žinome, kad dar pirmoje XIX a. pusėje prancūzų fizikas Amperas teigė, jog bet kurį magnetinį lauką sąlygoja elektros srovė. Ampero nuomone, magnetinės medžiagų savybės susijusios su medžiagos molekulių viduje cirkuliuojančiomis molekulinėmis srovėmis. Medžiagą tarytum sudaro elementarūs magnetėliai,— uždaros molekulinės srovės. Medžiagos magnetinės savybės priklauso nuo jų tarpusavio išsidėstymo ir orientacijos.

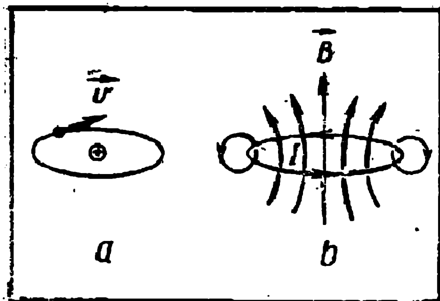
Dabar Ampero hipotezė yra įtikinamai pagrįsta, o svarbiausia, atskleista fizikinė šių elementarių „magnetėlių" esmė.

Medžiagos atomas turi magnetines savybes iš dalies todėl, kad apie teigiamai įkrautą branduolį skrieja elektronai. Apie branduolį skriejančius elektronus galima laikyti elementariais „magnetėliais", nes apskritiminė elektros srovė sukuria magnetinį lauką, panašų į nuolatinio magneto magnetinį lauką.

104 paveiksle, *a*, parodytas paprasčiausias atomas, sudarytas iš branduolio ir apie jį skriejančių elektronų; čia $\vec{v}$ — elektrono greičio vektorius. Elektros srovė, ekvivalenti elektrono judėjimui, turi priešingą elektrono judėjimui kryptį (104 pav., *b*). Tame pačiame paveiksle parodytas ir apskritiminę srovę atitinkantis magnetinis laukas. Indukcijos linijų kryptis nustatoma sraigto taisykle.

Tačiau atomo magnetinės savybės priklauso ne tik nuo elektronų orbitinio judėjimo. Atomą sudarančios elementarios dalelės, t. y. elektronai, protonai, neutronai, patys turi magnetinių savybių. Savo ruožtu juos visus galima įsivaizduoti kaip elementarius, tačiau skirtingų magnetinių savybių „magnetėlius".

Nors tam tikrą įtaką turi protonai ir neutronai, tačiau izoliuoto atomo magnetines savybes daugiausia nulemia elektronų magnetinės savybės. Kietojo kūno, turinčio milžinišką atomų kiekį, magnetines savybes nulemia ne tik to atomo elementarios dalelės, bet ir atomų dalelių sąveika. Norint išaiškinti medžiagų magnetines savybes, iš pradžių reikia įvesti kai kurias sąvokas ir dydžius.



104 pav.

31 užduotis. Patikrinkite, ar teisingai nustatyta 104 paveiksle, *b*, parodyta magnetinės indukcijos kryptis *B*.

49. ELEKTRONO ORBITINIAI IR SUKAMIEJI MAGNETINIAI MOMENTAI

Elektrono, judančio uždara orbita, magnetinio lauko charakteristikai įvedama sąvoka „orbitinio magnetinio lauko momentas $\vec{P}_0$". Tai vektorinis dydis, matuojamas elementarios srovės I ir ploto S, kuriuo ji teka, sandauga ($P_0 = IS$). Orbitinio magnetinio momento $\vec{P}_0$ kryptis nustatoma sraigto taisykle (105 pav.).

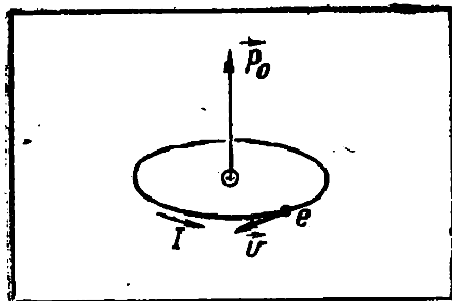
Orbita judantis elektronas taip pat turi ir mechaninį impulso momentą $\vec{L}_0$.

m masės materialus taškas, judėdamas greičiu $\vec{v}$, turi impulsą $\vec{P} = m\vec{v}$. Jei taškas skrieja r spindulio apskritimu, tai jo judėjimą galima apibūdinti impulso momentu $\vec{L}_0$. Jis lygus impulso $\vec{P} = m\vec{v}$ ir spindulio-vektoriaus $\vec{r}$ vektorinei sandaugai, t. y. $\vec{L}_0 = m\vec{v} \times \vec{r}$. Šio vektoriaus dydis $L = mvr$, o kryptis nustatoma sraigto taisykle (106 pav.).

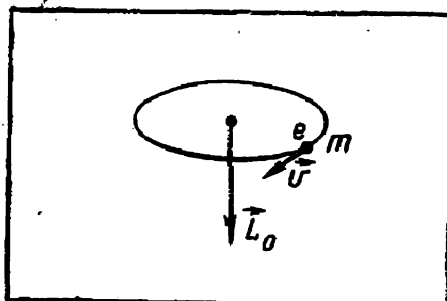
Iš 105 ir 106 paveikslų matyti, kad elektronas, be orbitinio magnetinio momento $\vec{P}_0$, turi ir orbitinį mechaninį momentą (impulso momentą) $\vec{L}_0$; šiuo atveju $\vec{P}_0$ ir $\vec{L}_0$ kryptys priešingos (107 pav.).

Dydis $G_{orb.}$, lygus P_0 ir L_0 santykiui, vadinamas giromagnetiniu santykiu. Elektronui, judančiam orbita apie branduolį $G_{orb.} = \frac{e}{2m}$; čia e — elektrono krūvis, o m — jo masė.

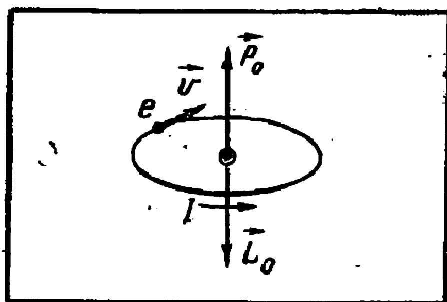
Šiuo metu įrodyta, kad elektronas, be orbitinių magnetinių ir mechaninių momentų (P_0 ir L_0), dar turi savus magnetinius



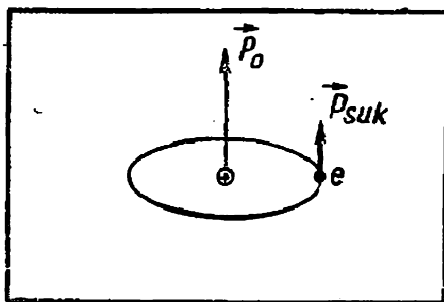
105 pav.



106 pav.



107 pav.



108 pav.

ir mechaninius momentus, kurie buvo pavadinti sukiniais $P_{suk.}$ ir $L_{suk.}$.

Iš pradžių sukiniai buvo susieti su elektrono sukimusi apie savo ašį. Dėl to ir prigijo terminas sukinys. Tačiau pasirodė, kad toks supratimas neteisingas. Sukinio $P_{suk.}$ dydis, apskaičiuotas pagal elektrono krūvį ir jo spėjamą sukimosi greitį, nesutampa su eksperimentine reikšme $P_{suk.}$. Elektronų judėjimo dėsniai labai sudėtingi ir jų neįmanoma nusakyti klasikinėmis sąvokomis.

Elektronas turi daug savybių, apibūdinamų ne tik jo krūviu ir mase, bet ir sukiniu bei savu mechaniniu momentu; elektrono $P_{suk.}$ ir $L_{suk.}$, kaip ir jo krūvis e bei masė m, yra neatskiriamos charakteristikos.

$P_{suk.}$ ir $L_{suk.}$ apibūdina giromagnetinis santykis:

$$G_{suk.}=\frac{P_{suk.}}{L_{suk.}}=\frac{e}{m},$$

t. y. $G_{suk.}=2G_{orb.}$.

Savus magnetinius momentus turi taip pat protonai ir neutronai. Tačiau jų savi magnetiniai momentai 103 karto mažesni už elektrono sukinius. Suprantama, protono ir neutrono magnetinių momentų, t. y. branduolio magnetinių momentų, galima nepaisyti. Elektroninėje magnetizmo teorijoje laikoma, kad atomo magnetinės savybės daugiausia priklauso nuo elektronų.

Atomo visas magnetinis momentas $P_{at.}$ yra priklausančių tam atomui elektronų orbitinių momentų ir sukinių geometrinė suma. Jei atome yra Z elektronų, tai

$$\vec{P}_{at.}=\sum_{1}^{z}\vec{P}_0+\sum_{1}^{z}\vec{P}_{suk.}$$

Kietų kūnų šios sumos rezultatai priklauso nuo kūno dalelių sąveikos.

108 paveiksle parodytas paprasčiausias atomas ir jo magnetiniai momentai $\vec{P}_0$ ir $\vec{P}_{suk.}$. Į branduolio magnetinį momentą nekreipiame dėmesio.

Jei atomas sudėtingas, tai jo suminis magnetinis momentas $\vec{P}_{at.}$ gali būti ir lygus, ir nelygus nuliui. Dėl to skirtingų medžiagų magnetinės savybės nevienodos.

32 užduotis. 1. Apskaičiuokite elektrono, judančio atomo orbita, giromagnetinį santykį *G*.

2. Paruoškite mažas informacijas šiomis temomis:

1) Materialaus taško impulso momentas. Jėgos momentas ir inercijos momentas. Materialaus taško, judančio apskritimu, lygtys.

2) Įvairių formų kūnų inercijos momentai.

3) Bet kurios formos kūno sukamojo judėjimo apie nejudamą ašį lygtys.

4) Impulso momento tvermės dėsnis.

Literatūra. Buchovcevas B. ir kt. Fizika (Mechanika). K., „Šviesa", 1972.

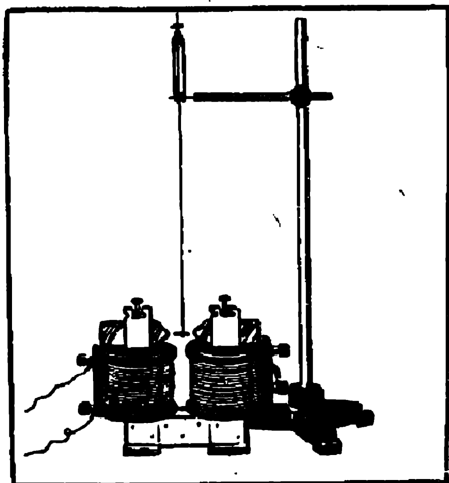
Механика. Факультативный курс. М., «Просвещение», 1971, 22—26 užduotis.

50. KIETŲ KŪNŲ KLASIFIKAVIMAS PAGAL MAGNETINES SAVYBES

Paprasčiausieji kietieji kūnai pagal magnetines savybes skirstomi į silpnai įmagnetintus ir stipriai įmagnetintus kūnus. Taip pat žinomas medžiagų klasifikavimas pagal jų magnetines savybes į diamagnetikus, paramagnetikus ir feromagnetikus.

Visi gamtoje esantys kūnai pagal magnetines savybes gali dar būti skirstomi ne į tris, o į penkias grupes: diamagnetikus, paramagnetikus, feromagnetikus, antiferomagnetikus ir ferimagnetikus (feritus).

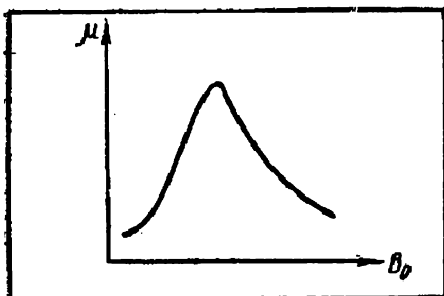
Medžiagas skirstyti pagal magnetines savybes daugiau kaip prieš šimtą metų pirmas pasiūlė M. Faradėjus. Jis laikydavo nevienalyčiame magnetiniame lauke skirtingų medžiagų pavyzdžius ir pastebėjo, kad dalis jų yra traukiama iš mažos indukcijos srities į didelės indukcijos sritį, ir nusistovi išilgai lauko indukcijos linijų, o dalis yra stumiama iš magnetinio lauko srities, kur didelė indukcija, ir nusistovi skersai indukcijos linijų. Pirmąją grupę jis pavadino paramagnetine [1], o antrąją — diamagnetine [2].



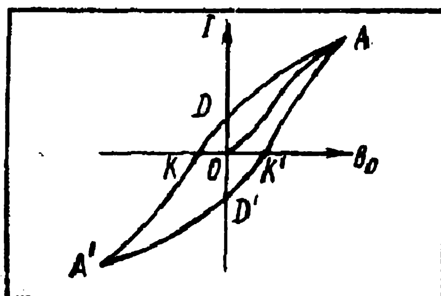
109 pav.

109 paveiksle parodytas įrengimas diamagnetinėms ir para-

[1] Para (graik.) — išilgai.
[2] Dia (graik.) — skersai.



110 pav.



111 pav.

magnetinėms savybėms demonstruoti. Pavyzdys išsidėstė išilgai indukcijos linijų — tai paramagnetikas.

Tarp paramagnetikų buvo rasta medžiagų grupė, pasižyminti itin stipriomis savybėmis, tarytum superparamagnetikai. Jai daugiausia priklauso geležis, nikelis ir kobaltas. Todėl šios medžiagos priskirtos ypatingai grupei — feromagnetinėms medžiagoms.

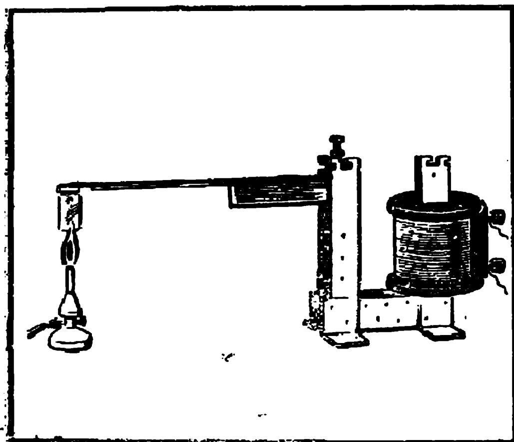
Visas šias medžiagas apibūdina skirtingas magnetinis skvarbumas μ: diamagnetikų $\mu<1$, paramagnetikų $\mu>1$, tačiau ir vienu, ir kitu atveju μ tik truputį skiriasi nuo vieneto. Feromagnetikų $\mu \gg 1$. Tačiau ne tik tuo skiriasi feromagnetinės savybės.

Feromagnetikų magnetinis skvarbumas μ nepastovus dydis, priklausąs nuo išorinio lauko indukcijos $\vec{B}_0$. Tokios priklausomybės pobūdis parodytas 110 paveiksle.

Feromagnetikai pasižymi liekamuoju magnetizmu, t. y gali turėti magnetinių savybių, ir pašalinus išorinį magnetinantį lauką.

Feromagnetikams būdinga magnetinė histerezė — reiškinys, atsirandąs permagnetinant feromagnetinį pavyzdį. Magnetinės histerezės esmė yra ta, kad pavyzdžio įmagnetėjimas I atsilieka nuo magnetinio lauko indukcijos B_0 kitimo. Tuo atveju $I = B - B_0 = (\mu - 1) B_0$. 111 paveiksle parodyta vadinamoji magnetinės histerezės kilpa.

Tam tikroje temperatūroje (vadinamoje Kiuri temperatūroje) feromagnetikai netenka feromagnetinių savybių ir virsta paprastais paramagnetikais. Tai galima patikrinti Kiuri temperatūros demonstravimui skirtu įrenginiu (112 pav.). Skuti-



112 pav.

mosi peiliukas kabo ant įmagnetinto plieninio strypo galo. Kaitinamas peiliukas tam tikru momentu nukris ant stalo. Tai rodo, kad jis neteko feromagnetinių savybių. Prineštas prie plieninio strypo ataušęs peiliukas bus pritrauktas vėl.

33 užduotis. 1. Stebėkite, kaip keičiasi feromagnetiko įmagnetinimas, kintant $\vec{B}_0$ (111 pav.). Sakoma, kad feromagnetiko indukcija priklauso nuo „istorijos“. Kaip tai suprasti?

2. Jeigu 111 paveiksle per kai kurias B_0 reikšmes išvesime tiesę, lygiagrečią ašiai I, tai pamatysime, kad vieną B_0 reikšmę atitiks ne viena I reikšmė. Ką tai reiškia?

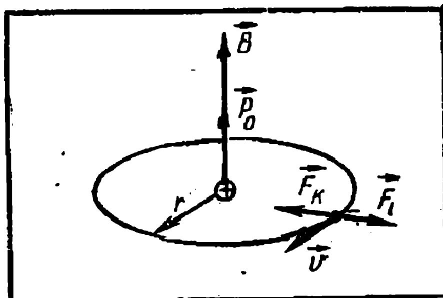
51. DIAMAGNETIZMAS. MAGNETINIO LAUKO ĮTAKA ELEKTRONŲ ORBITINIAM JUDĖJIMUI

Be išorinio magnetinio lauko diamagnetinių medžiagų atomai neturi magnetinio momento. Tokių atomų visų elektronų orbitiniai ir sukinio momentai vienas kitą kompensuoja. Diamagnetiniame kūne, laikomame magnetiniame lauke, atsiranda prieš lauką nukreiptas papildomas magnetinis momentas. Kaip tai paaiškinti?

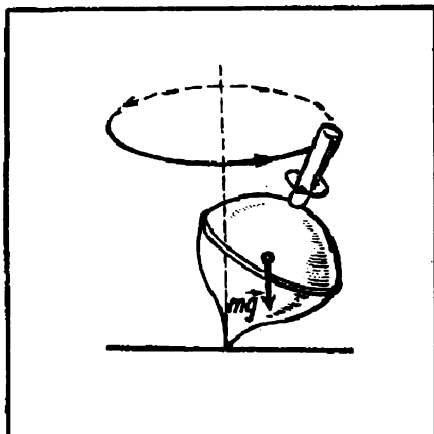
Tai paaiškinama, magnetiniame lauke esančiam atomui taikant Lenco dėsnį. Magnetinio lauko sudarymo momentu arba įnešant diamagnetinę medžiagą į sritį, kur jau yra magnetinis laukas, atomuose turi atsirasti indukcinės srovės. Iš tikrųjų atomuose juda elektronai, o magnetinis laukas kažkaip pakeičia tų elektronų judėjimą ir elektronų judėjimui ekvivalenčią srovę. Tačiau, kad būtų aiškiau, kalbėsime apie indukcinę srovę. Pagal Lenco dėsnį indukcinės srovės kryptis yra tokia, kad jos sukurtasis laukas yra priešingos įmagnetinimo laukui $\vec{B}_0$ krypties. Atsiradęs elektrono papildomas orbitinis magnetinis momentas yra nukreiptas prieš lauką. Šis efektas išlieka, ir išnykus indukcijos EVJ, kai magnetinis laukas nekinta. Tai aiškinama: elektronų judėjimui atome nėra pasipriešinimo, ir dėl to indukcinė srovė neužgęsta, net išnykus EVJ.

Jeigu atome skirtingų elektronų orbitiniai magnetiniai momentai gali vienas kitą kompensuoti, tai visuose elektronuose nukreipti prieš lauką papildomi elektronų magnetiniai momentai sumuojasi, t. y. susidaro atomo suminis papildomas magnetinis momentas.

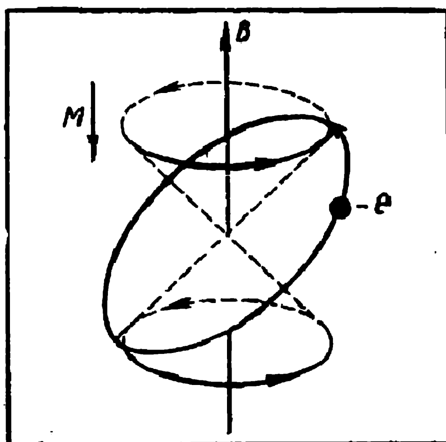
Diamagnetizmo atsiradimą dar galima aiškinti ir elektrono sukimosi apie branduolį dažnumo kitimu.



113 pav.



114 pav.



115 pav.

Bendrai panagrinėsime tik atskirą atvejį, kai elektrono orbitos plokštuma statmena magnetinio lauko indukcijos vektoriui $\vec{B}_0$ (113 pav.). Tuo atveju elektroną, be kuloninės jėgos $\vec{F}_k$, veikia Lorenco jėga $\vec{F}_l = evB_0$. Tolygiai veikianti jėga tuomet lygi arba $\vec{F}_k$ ir $\vec{F}_l$ sumai, arba skirtumui, todėl abiem atvejais įcentrinis pagreitis yra skirtingas. Jis arba didėja, arba mažėja,— atitinkamai kinta ir elektrono apsisukimo apie branduolį dažnumas. Kadangi kinta ekvivalenčios srovės stiprumas, tai šis dažnumo kitimas ir sąlygoja papildomo magnetinio momento atsiradimą.

Kol kas nagrinėjome paprasčiausią atvejį, kai išorinio magnetinio lauko vektorius $\vec{B}_0$ yra orbitos plokštumos normalė. Visais kitais atvejais įvyksta vadinamoji elektroninės orbitos precesija magnetiniame lauke.

Kad suprastume, kas yra precesija, stebėkime mechaninio vilkelio sukimąsi. Jei vilkelio ašis tiksliai vertikali, tai vilkelis tik greitai sukasi apie savo ašį. Jei vilkelio ašis nėra tiksliai vertikali, tai ji pradeda suktis apie vertikalę. Šis lėtas ašies sukimasis ir vadinamas precesija (114 pav.). Jei vektorius $\vec{B}$ nėra orbitos plokštumos normalė, tai analogiškai magnetiniame lauke precesuoja ir elektroninė orbita. Dėl šios precesijos atsiranda papildomas, nukreiptas prieš lauką, magnetinis momentas (115 pav.).

Diamagnetinis efektas yra nežymus, tačiau jis būdingas be išimties visiems atomams. Pastebėti diamagnetinį momentą pavyksta tik tuo atveju, kai jo neslopina stipresnis paramagnetinis efektas.

Diamagnetikų grupei priklauso visos inertinės dujos, taip pat kai kurie skysčiai (vanduo) ir metalai (varis, sidabras, auksas, berilis, cinkas, kadmis, boras, galis, švinas, stibis, bismutas ir t. t.).

34 užduotis. Apskaičiuokite elektrono orbitinio judėjimo magnetiniame lauke apskritiminio dažnumo ω pakitimą, kai vektorius $\vec{B}$ statmenas elektrono orbitos plokštumai (esant dviem elektrono greičio kryptims).

52. PARAMAGNETIZMAS

Paramagnetikų atomai ir molekulės turi pastovų magnetinį momentą, t. y. dalelių magnetiniai momentai, jų dedamosios viena kitos nekompensuoja. Tokie atomai ir molekulės magnetiniame lauke „elgiasi“ kaip magnetinė rodyklė,— nusistovi pagal polius.

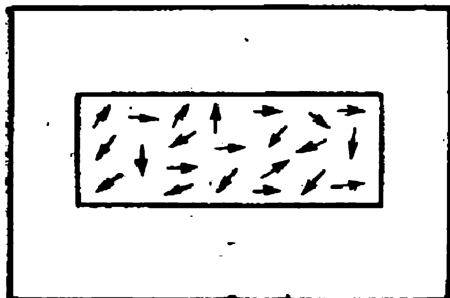
Stebint, kaip magnetiniame lauke elgiasi paramagnetinės medžiagos, reikia atsižvelgti į tai, kad **magnetinis laukas orientuoja atomų magnetinius momentus, o šiluminis judėjimas, atvirkščiai,— dezorientuoja.** Kadangi veikia abu faktoriai, tai nusistovi tam tikras magnetinių momentų pasiskirstymas, kuris ir nulemia kūno suminį magnetinį momentą.

116 paveiksle parodyta paramagnetiko atomų magnetiniai momentai, kai nėra išorinio magnetinio lauko. Atskirų atomų magnetiniai momentai vienodai orientuoti visomis kryptimis, ir vidutinis viso kūno magnetinis momentas lygus nuliui.

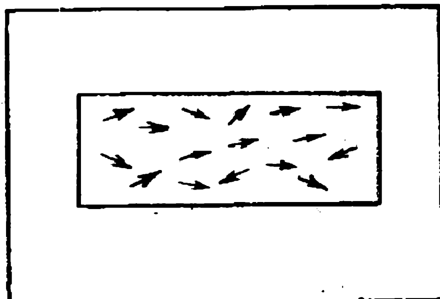
117 paveiksle parodyta, kaip, veikiant išoriniam magnetiniam laukui, paramagnetike atsiranda elementarių magnetinių momentų vyraujanti kryptis. Dabar kūno vidutinis magnetinis momentas nėra lygus nuliui ir kūnas poliškai įsimagnetina. Aišku, kad magnetinių momentų polinės orientacijos laipsnis priklauso nuo lauko indukcijos stiprumo.

Paramagnetikų įmagnetinimas šiek tiek priklauso nuo temperatūros.

Paramagnetinių medžiagų daug: kai kurios dujos (N_2, O_2 ir kt.), lantanoidų druskos, geležis, kobaltas, nikelis ir taip pat



116 pav.



117 pav.

daugelis metalų (šarminiai metalai, magnis, kalcis, aliuminis, chromas, molibdenas, manganas, platina, paladis ir kt.).

35 užduotis. Pagal turimas žinias apie magnetizmo prigimtį paaiškinkite, kaip įsivaizduojate paramagnetikų įmagnetinimo priklausomybę nuo temperatūros.

53. FEROMAGNETIZMAS. ELEMENTARŪS FEROMAGNETIZMO NEŠĖJAI

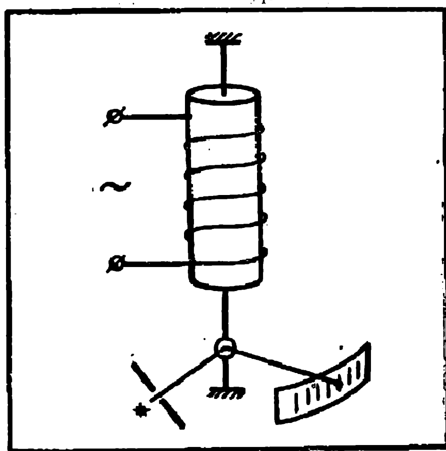
Diamagnetizmas priklauso nuo to, kaip magnetinis laukas veikia medžiagos atomo ir molekulių orbitinį judėjimą. Paramagnetizmas atsiranda dėl to, kad medžiagos dalyje suminis (orbitinis ir sukinio) atomų momentas nelygus nuliui. Diamagnetikai ir paramagnetikai yra silpnos magnetinės medžiagos. Kyla klausimas, nuo ko priklauso feromagnetizmas. Kas stipriose magnetinėse medžiagose yra magnetizmo nešėjai?

Feromagnetizmo nešėjai buvo eksperimentiškai nustatyti, tiriant vadinamuosius giromagnetinius reiškinius. Atliekant šiuos bandymus, buvo nustatyta giromagnetinis santykis *G*.

Panagrinėkime vieną iš pačių įdomiausių giromagnetinių bandymų, kurį 1915 m. atliko Einšteinas ir de Gazo. Atliekant šį bandymą, ant plono kvarcinio siūlo pakabintas geležinis cilindras buvo įneštas į solenoido vidų pagal jo ašį (118 pav.). Solenoidu buvo galima leisti srovę. Ant kvarcinio siūlo pritvirtintas veidrodėlis, į kurį nukreiptas šviesos spindulių pluoštas. Šis pluoštas, atsispindėjęs nuo veidrodėlio kaip „šviesos zuikutis", pateko į ekraną. Truputį pasukus siūlą, pasisukdavo ir veidrodėlis, todėl šviesos zuikutis pasislinkdavo ekrane. Buvo gautas labai jautrus siūlo pasisukimo indikatorius.

Kad suvoktume Einšteino ir de Gazo bandymą, reikia išaiškinti impulso momento tvermės dėsnio esmę. Pasirodo, kad kiekvienas besisukantis kūnas turi impulso momentą $\vec{P}$, kuris priklauso nuo kūno arba kūno dalelės greičio ir nuotolio nuo sukimosi ašies. Kuo didesnis greitis $\vec{v}$ (arba $\vec{\omega}$) ir taško atstumas nuo sukimosi ašies, tuo didesnis ir dydis $\vec{P}$.

Nustatyta, kad, kai kūno neveikia jokios jėgos, galinčios pakeisti jo sukimąsi, impulso momentas $\vec{P}$ yra pastovus ($\vec{P}=\text{const}$). Daugelis bandymų ir dažnai gyvenime stebimi reiškiniai patvirtina impulso momento tvermės dėsnį. Paprasčiausias pavyzdys — figūrininko sukimasis. Jei figūrininkas sukasi, tai norint, kad jo sukimosi kampinis greitis padidėtų, pakanka prie kūno priglausti rankas. Priešingai, jeigu jis rankas išskečia, tai sukimosi kampinis greitis sumažėja. Tai įvyksta todėl, kad besisukančio figūrininko impulso momentas turi būti pastovus. Tačiau šis dydis pri-





118 pav. 119 pav.

klauso nuo kampinio greičio ω ir nuotolio nuo sukimosi ašies r. Todėl, figūrininkui suglaudus rankas, r sumažėja, o ω, atvirkščiai,— padidėja.

Kad suprastume Einšteino ir de Gazo bandymą, geriausiai atlikime bandymą su Žukovskio suoleliu (119 pav.). Žukovskio suolelis — nedidelė aikštelė, galinti laisvai suktis apie vertikalią ašį. Ant Žukovskio suolelio esantis žmogus gavo besisukantį dviračio ratą (119 pav., *a*), kurio impulso momentas $\vec{P}$ nukreiptas žemyn. Jei žmogus rato ašį pasuks 180° (119 pav., *b*), rato impulso momentas pasikeis ir bus ne $\vec{P}$, o $-\vec{P}$. Tada pagal impulso momento tvermės dėsnį atsiranda papildomas impulso momentas, o suminis momentas nepakinta. Ir tikrai, žmogus ant Žukovskio suolelio pradeda suktis į tą pusę, į kurią anksčiau sukosi dviračio ratas.

Dabar panagrinėkime mus dominantį Einšteino ir De Gazo bandymą. Praleidę solenoidu tam tikros krypties srovę, įmagnetinsime strypą. Tada visi orbitiniai ir sukinio momentai šerdyje turi orientuotis pagal lauką. Tam tikru būdu turi orientuotis ir atomų mechaniniai momentai (impulso momentai). Jei dabar, pakeitę solenoide srovės kryptį, permagnetintume šerdį, turėtų pakisti ir magnetinių, ir mechaninių momentų orientacija. Dėl to strypas turi suktis panašiai kaip žmogus, apvertęs dviračio ratą, sukosi ant Žukovskio suolelio. Tačiau, dėl tos priežasties Einšteino ir de Gazo bandyme pasireiškęs efektas labai silpnas ir mokslininkai jį sustiprino, panaudodami mechaninio rezonanso reiškinį. Į solenoidą buvo tiekiama kintamoji įtampa, kurios dažnumas sutapo su sistemos savais sukamaisiais svyravimais. Šviesos zuikutis tuo atveju pasislinko pakankamai daug.

Einšteino ir de Gazo bandyme buvo nustatyta giromagnetinis santykis G, lygus $\frac{e}{m}$, t. y. feromagnetizmą sąlygoja ne orbitiniai, o sukinio magnetiniai momentai.

36 užduotis. Paruoškite pranešimą apie A. Jofės, P. Kapicos ir Barneto bandymus.

Literatūra. Путилов К. А. Курс физики. Т. 2. М., Физматгиз, 1963.

54. FEROMAGNETIZMAS IR KRISTALINĖ GARDELĖ. FEROMAGNETIKŲ DOMENINĖ STRUKTŪRA

Kyla klausimas: kodėl paramagnetikams nebūdingos feromagnetikų savybės, jų sukinius turi ir paramagnetikų atomų elektronai? Pasirodo, kad tai priklauso ne tik nuo elektronų nesukompensuotų sukinių, bet ir nuo tų elektronų ypatingos tarpusavio sąveikos.

Feromagnetizmas būdingas ne kiekvienai medžiagai ir ne kiekvienai jos būsenai. Jis galimas tik kristalinės būsenos kai kuriose medžiagose ir temperatūrose, žemesnėse už nustatytas tos medžiagos tam tikras temperatūras. Tai medžiagos, kurių elektroniniame apvalkale yra neužpildytų vidinių sluoksnių. Jose ir susidaro nekompensuoti sukinio momentai.

Paaiškinti, kodėl feromagnetikai pasižymi stipriomis magnetinėmis savybėmis, pirmasis bandė rusų fizikas B. Rozingas. Jis 1892 m. išreiškė mintį, kad ypatingų jėgų veikiamame feromagnetike atsiranda tam tikros įmagnetintos sritys. 1902 m. prancūzų fizikas P. Veisas sukūrė hipotezę, kad feromagnetiko kristale yra iki prisotinimo įmagnetintos sritys — domenai. Jei nėra išorinio magnetinio lauko, atskirų domenų magnetiniai momentai orientuoti skirtingomis kryptimis ir kūno bendras magnetinis momentas lygus nuliui. Magnetiniame lauke šios įmagnetintos sritys (domenai) orientuojasi pagal lauką.

Veiso hipotezę apie feromagnetinių medžiagų domeninę struktūrą tik 1935 m. teoriškai pagrindė savo darbuose tarybiniai fizikai L. Landau ir E. Lifšicas.

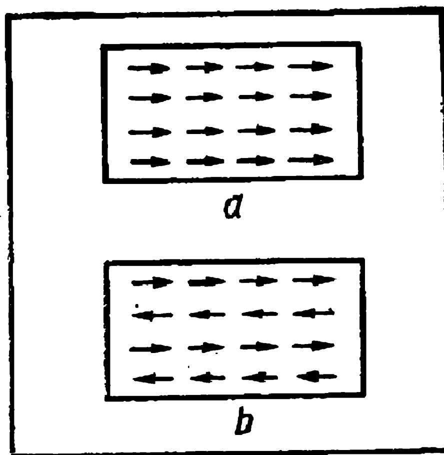
Buvo nustatyta, kad **egzistuoja ypatingos, kvantinės mechanikos aprašomos jėgos, kurios priverčia domeno viduje visus sukinius išsidėstyti lygiagrečiai.**

Nors domenų matmenys maži (nuo 10^{-2} iki 10^{-5} cm), tačiau pavyko juos pamatyti pro mikroskopą. Dar 1931 m. tarybiniai fizikai N. Akulovas ir M. Dechtiaras, taip pat nepriklausomai nuo jų amerikiečių fizikas S. Biteris pasiūlė feromagnetikų domeninės struktūros stebėjimo metodą, pavadintą miltelinių figūrų metodu. Feromagnetiko kristalo paviršius poliruojamas ir ant jo užlašinamas vandens bei smulkių feromagnetinių miltelių suspensijos lašas.

Suspensijos dalelės nusėda ant domenų sienelių ir jie tampa matomi pro mikroskopą.

37 užduotis. 1. Paaiškinkite, kodėl feromagnetiniai milteliai nusėda ant domenų sienelių.

2. Remdamiesi domenų (sričių, kuriose vienodai orientuoti sukiniai) teorija, paaiškinkite pagrindines feromagnetikų savybes.



120 pav.

55. ANTIFEROMAGNETIZMAS IR FERIMAGNETIZMAS (FERITAI)

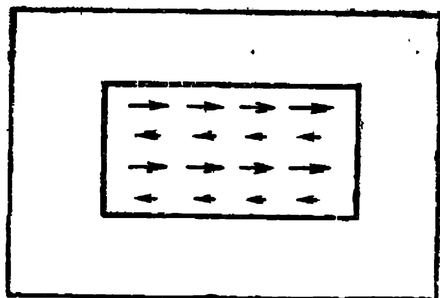
Feromagnetikuose yra domenų, kuriuose visi sukiniai orientuoti lygiagrečiai (120 pav., *a*). 1933 m. L. Landau numatė, kad turi egzistuoti medžiagos, kuriose domenų sukiniai yra antiparaleliniai (120 pav., *b*). Tokios medžiagos tikrai egzistuoja (MnO, MnS, NiCr ir kt.), ir jos buvo pavadintos antiferomagnetikais. Kol kas šios medžiagos praktiškai nepritaikomos, tačiau jas labai įdomu nagrinėti teoriškai.

Antiferomagnetiko kristalinę gardelę paprasčiausiu atveju galima laikyti dviejų erdvinių, tarytum viena į kitą „įstumtų", gardelių sankaupa. Kiekviena tokių gardelių vadinama pogardele. Kiekvienoje pogardelėje, visuose jos elementuose, magnetinių momentų orientacija vienoda, o „įstumtose" viena į kitą pogardelėse — antiparalelinė.

Kokios gi antiferomagnetikų savybės? Žemose temperatūrose šių medžiagų magnetinis skvarbumas mažas. Kylant temperatūrai, didėja šių medžiagų magnetinis skvarbumas μ. Tačiau yra tam tikra temperatūra, kurioje medžiaga netenka antiferomagnetinių savybių. Ši antiferomagnetikų temperatūra, analogiška feromagnetikų Kiuri temperatūrai, vadinama *Nelio temperatūra.*

Antiferomagnetikai sunkiai atskiriami nuo kitų magnetinių medžiagų. Lengviausiai tai padaroma, nustatant magnetinio medžiagos skvarbumo priklausomybę nuo temperatūros. Jei medžiaga tam tikroje temperatūroje yra maksimaliai skvarbi, tai tikriausiai ji yra antiferomagnetikas. Ši temperatūra — Nelio temperatūra.

Didesnę praktinę reikšmę turi medžiagos, pavadintos *feritais.* Kad suprastume feritų savybes, įsivaizduokime kristalą, kurio struktūra atitinka dvi pogardeles. Šios pogardelės turi skirtingo dydžio ir priešingų krypčių magnetinius momentus (121 pav.). Tuo atveju visiškos magnetinės kompensacijos nėra. Tokia me-



121 pav.

džiaga (ferimagnetikas) turi panašias savyybes kaip ir feromagnetikas, tik jos įmagnetinimo priklausomybė nuo temperatūros sudėtingesnė.

Feritai yra kietieji tirpalai, sudaryti iš geležies oksidų ir vieno arba kelių metalų oksidų. Jie gaunami, 900—1400°C temperatūroje kepinant susmulkintus ir sumaišytus oksidus. Dažniausiai feritai pritaikomi prietaisuose, kurie tiekia superaukšto dažnumo (SAD) srovę, tais atvejais, kai reikia sumažinti nuostolius ričių šerdyse (Fuko srovių nuostolius). **Feritai — puslaidininkiai, jų specifinė varža kur kas didesnė už metalinių feromagnetikų specifinę varžą.** Feritų magnetinis svarbumas pakankamai didelis.

38 užduotis. 1. Grafiku atvaizduokite magnetinio skvarbumo μ priklausomybės nuo temperatūros *T* pobūdį: a) feromagnetikui, b) antiferomagnetikui.
2. Paruoškite pranešimą tema: „Kur pritaikomi feromagnetikai".

Literatūra. Киренский Л. В. Магнетизм. Изд. 2-е. М., «Наука», 1967. Вонсовский С. В. Магнетизм. Современные представления. — «Природа», 1963, № 2.

LITERATŪRA VIII SKYRIUI

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1972.
Киренский Л. В. Магнетизм. Изд. 2-е. М., «Наука», 1967.
Карцев В. П. Магнетизм за три тысячелетия. М., Атомиздат, 1968.
Карцев В. П. Максвелл. М., «Молодая гвардия», 1974.
Вонсовский С. В. Магнетизм. Современные представления. — «Природа», 1963, № 2.

IX SKYRIUS

UŽDAVINIŲ SPRENDIMO PRAKTIKUMAS

56. VII SKYRIAUS UŽDAVINIAI (KIETŲJŲ KŪNŲ ELEKTRINĖS SAVYBĖS)

Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

1 uždavinys. Kristale kiekvienam vario atomui tenka po vieną laisvą elektroną. Apskaičiuokite vario laidumo elektronų koncentraciją.

Sprendimas. Laidumo elektronų koncentracija lygi tūrio vienete esančių vario atomų skaičiui, t. y. $n=\frac{N_A\rho}{M}$; čia $N_A=6{,}02\cdot10^{23}$ mol^{-1} — Avogadro skaičius; $\rho=8{,}9\cdot10^3$ kg/m^3 — vario tankis; $M=64\cdot10^{-3}$ kg/mol — vario molinė masė.

Iš čia $n=\dfrac{6{,}02\cdot10^{23}\,\text{mol}^{-1}\cdot8{,}9\cdot10^{3}\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{64\cdot10^{-3}\,\frac{\text{kg}}{\text{mol}}}=8{,}5\cdot10^{28}\ \text{m}^{-3}$.

2 uždavinys. Esant temperatūrai T=0°K, metale elektrono energija Fermio lygyje yra apie 10 eV. Taikydami klasikinę elektronų teoriją, pasakykite, kokioje temperatūroje elektronas turėtų tokią energiją?

Sprendimas. Pagal klasikinę elektronų teoriją, vidutinė elektrono energija yra kT eilės dydžio. Tuomet 10 eV energiją elektronas turės įgyti temperatūroje $T_F=\frac{E_F}{k}$ (čia k — Bolcmano konstanta, lygi $1{,}38\cdot10^{-23}$ J/deg):

$$T_F=\frac{16\cdot10^{-19}\,\text{J}}{1{,}38\cdot10^{-23}\,\frac{\text{J}}{\text{deg}}}=12\cdot10^4\ \text{°K}.$$

Taigi visose praktiškai pasiekiamose temperatūrose elektroninių dujų metaluose negalima laikyti idealiomis. Metale laidumo elektronų visumai tinka kvantinės teorijos dėsniai.

UŽDAVINIAI SAVARANKIŠKAM DARBUI

7—1. Metaliniuose laidininkuose didžiausias srovės tankis yra 10 A/mm^2. Apskaičiuokite orientuoto elektronų judėjimo vidutinį greitį, kai vidutinė elektronų koncentracija metaluose 10^{28} m^{-3}.

Palyginkite jį su elektronų šiluminio judėjimo vidutiniu greičiu kambario temperatūroje (300°K).

7—2. Vienvalenčio metalo $T-0°K$ temperatūroje Fermio energija yra 7 eV. Apskaičiuokite, kiek reikia energijos, metalo elektronui pereinant iš vieno energijos lygio į kitą zonos viduje. Elektronų koncentracija 10^{29} m^{-3}.

7—3. Apskaičiuokite energiją, kurią pagal klasikinę elektronų teoriją įgis elektronas, nuėjęs laisvą kelią ($\lambda=10^{-10}$ m) elektriniame lauke, kurio stiprumas $E=1V/m$. Vidutinis šiluminio judėjimo greitis 10^5 m/s. Ar užteks gautos energijos elektronui pereiti tarp zonų kristale? Zonos viduje?

7—4. Du skirtingi metalai stipriai suglaudžiami. Metalas A turi Fermio energiją $E_1=3$ eV, ir jo išsilaisvinimo darbas $A_1=1$ eV. Metalas B atitinkamai turi $E_2=2$ eV ir $A_2=1{,}5$ eV. Kas įvyks, sujungus tuos metalus? Kokį potencialą įgis metalas A atžvilgiu B?

7—5. Įrodykite, kad dielektriko tūrio vieneto dipolio momentas skaitine reikšme lygus dėl poliarizacijos atsiradusio paviršiaus krūvio tankiui.

7—6. Kiek laidumo elektronų yra viename g germanio, kuris turi $4\cdot10^{-6}$ g arseno?

7—7. Pagal šiuolaikinę grynų puslaidininkių gamybos technologiją, galima pagaminti gryną germanį — jame yra ne daugiau 10^{-9}% priemaišų. Apskaičiuokite, kiek priemaišų atomų yra viename cm^3 germanio.

7—8. Kokio tipo yra germanio su fosforo, cinko, boro priemaišomis laidumas? Silicis su aliuminio, indžio, stibio priemaišomis?

7—9. 100 g masės germanio monokristale yra 10^{-6} g stibio. Germanio tankis $5{,}4\cdot10^3$ kg/m^3. Stibio santykinė atominė masė 122. Laikydami, kad visi stibio atomai (ir tik jie!) jonizuoti, apskaičiuokite krūvių nešėjų kristale koncentraciją. Kokie tai nešėjai: skylutės ar elektronai?

7—10. Kokiomis sąlygomis atsiranda metalų superlaidumas? Ar galima gauti superlaidų silicį arba germanį?

7—11. Ar galima gauti p—n perėjimą, įlydžius alavą į germanį?

7—12. Pagal įrengimą ir elektrines savybes puslaidininkinis triodas panašus į vakuuminį. Palyginkite elektrodus, užpildę šią lentelę.

Vakuuminis triodas	Anodas	Tinklelis	Katodas
Tranzistorius			

7—13. Nurodykite puslaidininkinių prietaisų teigiamas savybes ir trūkumus, juos lygindami su vakuuminiais. Surašykite juos į šią lentelę.

Puslaidininkiniai prietaisai	
Privalumai	Trūkumai

57. VIII SKYRIAUS UŽDAVINIAI (MEDŽIAGŲ MAGNETINĖS SAVYBĖS)

8—1. Toliau pateikti palyginamieji jėgų dydžiai. Kambario temperatūroje ir stipriame magnetiniame lauke jos veikia vienodos masės (1 g) skirtingų medžiagų pavyzdžius. (Jėgos ženklas rodo jos veikimo kryptį: (+) atitinka pavyzdžio traukimą į lauką, ženklas (–) išstūmimą.)

Medžiaga	Jėga (10^{-5} N)
Varis	–2,6
Švinas	–37
Natrio chloridas	–15
Grafitas	–110
Natris	+20
Aliuminis	+17
Nikelio sulfatas	+830
Geležis	+400 000

Lentelę panaudokite, atsakydami į šiuos klausimus:

1. Kurios šių medžiagų paramagnetikai, diamagnetikai ir feromagnetikai?
2. Kurias dar žinote šioms grupėms priklausančias medžiagas?
3. Palyginkite pavyzdžius veikiančias jėgas. Padarykite išvadas.
4. Palyginkite jėgas, veikiančias geležį ir varį. Kokie jums kyla sunkumai, tiriant vario magnetines savybes? Kokią įtaką eksperimento rezultatams turės varyje esančios geležies priemaišos?
5. Kokios magnetinės savybės pasireiškia bet kokios agregatinės būsenos medžiagoje ir kokios tik kristaluose?

8—2. Geležies įmagnetinimas (t. y. visų atomų, esančių tūrio vienete, suminis magnetinis momentas) lygus $1{,}84 \cdot 10^6$ A/m. Apskaičiuokite geležies atomo vidutinį magnetinį momentą. Kokį apytikriai orientuotų sukinių kiekį ($p_3 = 9 \cdot 10^{-24}$ A·m²) atitinka šis įmagnetinimas?

8—3. Nubraižykite plieninio strypelio įmagnetinimo priklausomybės nuo magnetinio lauko stiprumo grafiką. Ar yra įmagneti-

nimo riba? Paaiškinkite tai feromagnetikų domeninės struktūros požiūriu.

8—4. Kambario temperatūroje prie nuolatinio magneto polių paeiliui prinešamos geležies, nikelio ir 30% permalojaus plokštelės. Plokštelės įsimagnetina ir išlaiko prie magneto pritrauktą tam tikrą krovinį. Iš apačios prineškime indą su karštu vandeniu (90°C) taip, kad vanduo apsemtų plokšteles. Ar išsilaikys krovinys?

*8—5. Kaip galima paaiškinti tai, kad plieninis strypelis, kalamas nemagnetinės medžiagos plaktuku, įsimagnetina? Kokiomis sąlygomis tai galima padaryti?

*8—6. Ilgai laikomų pasaginių magnetų poliai sujungiami plokštelėmis. Kodėl taip daroma? Iš kokios medžiagos turi būti ta plokštelė? Piešiniu paaiškinkite jos paskirtį.

Kai kurių elementų kristalinės struktūros ir charakteristikos kambario temperatūroje

Elementas	Struktūra	Tankis	Konstanta
Aliuminis	pck	2,70	4,04
Auksas	pck	19,32	4,07
Baris	eck	3,5	5,01
Berilis	heks	1,82	2,27
Bismutas	romboedr	9,80	4,74
Cinkas	heks	7,13	2,66
Chromas	eck	7,19	2,88
Geležis	eck	7,87	2,86
Germanis	deimanto	5,36	5,65
Helis	heks	—	3,57 (2K)
Kalis	eck	0,86	5,33
Litis	eck	0,53	3,50
Magnis	heks	1,74	3,20
Natris	eck	0,97	4,28
Nikelis	pck	8,90	3,52
Platina	pck	21,45	3,92
Sidabras	pck	10,49	4,08
Silicis	deimanto	2,33	5,43
Švinas	pck	11,34	4,94
Titanas	heks	4,54	2,95
Vanadis	eck	6,0	3,03
Varis	pck	8,96	3,61

X SKYRIUS

ELEKTRODINAMIKOS PAGRINDŲ FIZIKINIS PRAKTIKUMAS

58. 1 DARBAS. ELEKTRINIO TERMOMETRO GRADAVIMAS

Fizikoje ir technikoje elektriniai termometrai daug kur naudojami. Elektriniais termometrais galima matuoti labai žemas (artimas absoliutiniam nuliui) ir aukštas (didesnes kaip 1500°C) temperatūras.

Pagal veikimo principą elektriniai termometrai skirstomi į parametrinius daviklius ir generatorinius daviklius.

Parametrinių daviklių veikimas pagrįstas tuo, kad matuojamieji dydžiai paverčiami elektriniais parametrais (varža, talpa ir t. t.). Generatorinių daviklių veikimas pagrįstas tuo, kad matuojamas dydis paverčiamas elektrovaros jėga. Generatoriniai davikliai dirba be papildomų maitinimo šaltinių, tačiau kai kada generatorinio daviklio signalams sustiprinti reikia stiprintuvo.

Tipinis parametrinis daviklis yra elektrinės varžos termometras, kuriuo galime matuoti nuo 5 iki 1000°K temperatūras.

Generatorinis daviklis yra termopora, termostulpelis, pjezoelementas ir kt.

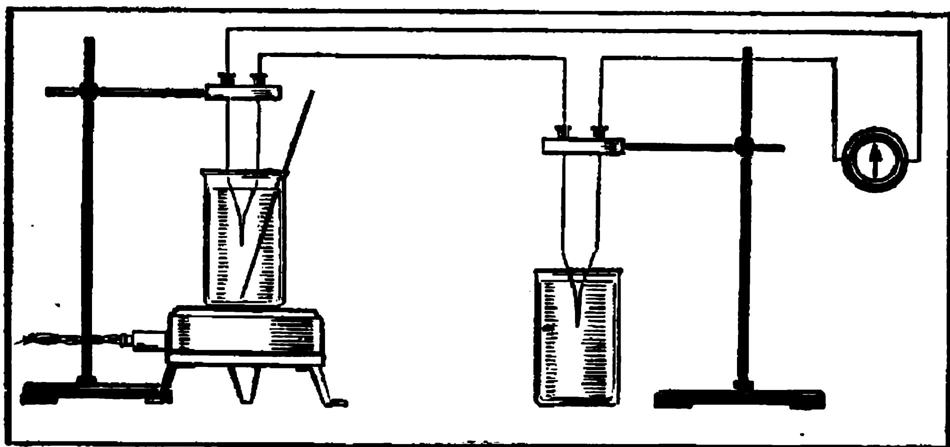
Jei termoporos arba termobaterijos sujungimai (kontaktai) yra skirtingose temperatūrose, tai jose atsiranda elektrovaros jėga. Kai temperatūrų intervalai maži, termoelementų elektrovaros jėga proporcinga sujungimų temperatūrų skirtumui, t. y. $E=C\Delta t$; čia C — pastovus dydis, jei temperatūrų skirtumas nelabai didelis. Šis dydis neviršija kelių mikrovoltų vienam laipsniui.

Darbo turinys yra galvanometro skalės gradavimas laipsniais.

Priemonės. Termoporos (2 vnt.), $3\cdot10^{-5}$ A/pad jautrumo ampermetro galvanometras, laboratoriniai stovai su mova ir laikikliais (2 vnt.), 250 mm³ talpos cheminės stiklinės (2 vnt.), cheminis termometras, elektrinė plytelė su jungiamuoju laidu, asbestuotas tinklelis, jungiamieji laidai.

Darbo eiga

1. Į abi stiklines įpilkite kambario temperatūros vandens. Vieną stiklinę padėkite ant elektrinės plytelės su asbestuotu tinkleliu (122 pav.). Į šią stiklinę panardinkite termoporą ir cheminį termometrą. Į kitą stiklinę įdėkite kitą termoporą. Įtvirtinkite termoporas stovuose taip, kad jos nesiektų stiklinių dugno.
2. Konstantanines termoporų vielas sujunkite viena su kita, o geležines jungiamaisiais laidais — su galvanometro gnybtais.
3. Korektoriumi nustatykite galvanometro rodyklę ties nuliu.



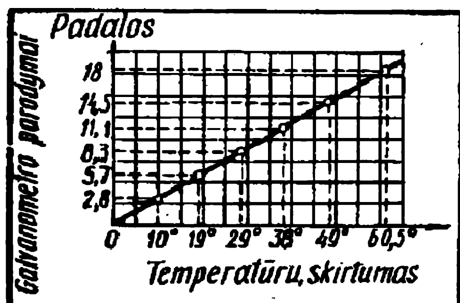
122 pav.

4. Išmatuokite pradinę vandens temperatūrą. Įjunkite plytelę.

5. Kaitindami stiklinėje vandenį, užrašykite jo temperatūrą kas 10—20°C ir kartu lentelėje užrašykite galvanometro parodymus, kurie atitinka cheminio termometro temperatūros reikšmes. Bandymo metu antroje stiklinėje vanduo neturi įkaisti.

6. Gradavimą atlikite standaus popieriaus lape, smeigtukais pritvirtintame prie skalės, arba antroje galvanometro skalės pusėje.

Matavimo Nr.	Sujungimo temperatūra		Sujungimo temperatūrų skirtumas °C	Galvanometro parodymai	Galvanometro parodymo padidėjimas, pakilus temperatūrai 1°C
	1-oji termopora	2-oji termopora			



123 pav.

7. Išanalizuokite gautus rezultatus ir padarykite išvadas, kaip įtampos kitimas elektrinio termometro grandinėje priklauso nuo temperatūrų skirtumo tarp termoporų.

8. Pagal lentelės duomenis nubraižykite grafiką (123 pav.), vaizduojantį termoporos grandinės įtampos priklausomybę nuo sujungimų temperatūrų skirtumo.

1. Kokios gali būti gradavimo paklaidų priežastys?
2. Koks elektrinio termometro veikimo principas?
3. Kodėl nerekomenduojama ilgai laikyti termometrą karštame vandenyje?

59. 2 DARBAS. PUSLAIDININKINIO TRIODO (TRANZISTORIAUS) NAGRINĖJIMAS

Darbo tikslas: išnagrinėti tranzistoriaus, kaip srovės stiprintuvo, veikimą, gauti jo išėjimo ir įėjimo charakteristikas.

Tranzistoriaus stiprinimo savybės laikomos nustatytomis, jei žinomi srovės stiprinimo, įtampos ir galingumo (perdavimo) koeficientai, taip pat jo įėjimo ir išėjimo varžos.

Šie parametrai priklauso nuo tranzistoriaus jungimo schemos. Tranzistorių į schemą galima jungti trimis būdais: su bendru emiteriu [1], su bendra baze, su bendru kolektoriumi.

Plokštiniams triodams daugiausia naudojama schema su bendru emiteriu. Schema su bendru emiteriu panaši į schemą su bendru katodu. Ja galima labai sustiprinti srovę (iki 100), įtampą (iki kelių tūkstančių) ir galingumą. Įėjimo ir išėjimo varžos turi vidutines reikšmes (atitinkamai vieno ir kelių dešimčių kiloomų).

Schemoje su bendru emiteriu valdymo srovė yra silpna, bazės srovė ΔI_b, nes ji proporcinga signalo, prijungiamo tarp emiterio ir bazės, įtampai, o sustiprintas signalas gaunamas iš kolektoriaus ir emiterio. Esant nuolatinei kolektoriaus įtampai, *srovės stiprinimo koeficientu* β vadinamas kolektoriaus srovės pokyčio ir bazės srovės pokyčio santykis $\left(\frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}\right)$.

Įėjimo charakteristika vadinama bazės srovės priklausomybė nuo bazės įtampos $I_b = f(U_b)$, esant nuolatinei kolektoriaus įtampai (U_k=const).

Išėjimo charakteristika vadinama kolektoriaus srovės priklausomybė nuo jo įtampos $I_k = f(U_k)$, esant nuolatinei bazės srovei (I_b=const).

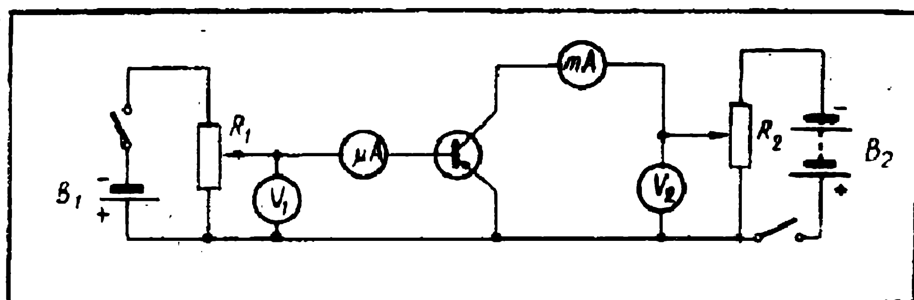
Įėjimo varža yra $r_{įėj.} = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b}$, kai U_k=const.

Išėjimo varža — $r_{išėj.} = \frac{\Delta U_k}{\Delta I_k}$, kai I_b=const.

Priemonės. Puslaidininkinis triodas (П-13—П-16), sumontuotas ant skydelio su trimis išvadais (*B*, *E*, *K*), mikroampermetras, miliampermetras, du voltmetrai (3 ir 15 V skalėmis), akumuliatorių baterijos 3 — HKH arba kitas atitinkamas srovės šaltinis (3 vnt.), 50—100 kΩ reostatas (2 vnt.), raktas (2 vnt.), laidai.

---

[1] Bendru vadinamas toks elektrodas, kuris tiesiogiai sujungiamas ir su įėjimo, ir išėjimo grandinėmis; paprastai šis elektrodas įžeminamas.



124 pav.

Darbo eiga

1. Nagrinėjamą triodą įjunkite kaip nuolatinės srovės stiprintuvą; dėl to surinkite schemą pagal 124 paveikslą. Surinktą schemą būtinai parodykite mokytojui.

Dėmesio! Kadangi tranzistoriai labai jautrūs perkrovimams, reikia laikytis tam tikros perėjimų jungimo eilės. Kolektoriaus įtampą įjungti arba išjungti galima, tik esant įtampai bazėje. (Pirmiausia įjungiamas emiterio perėjimas.)

2. Patikrinkite triodo stiprinamąjį veikimą ir nustatykite triodo srovės stiprinimo koeficientą.

Dėl to, potenciometru R_1 keisdami bazės įtampą nuo 0 iki 0,5 V, stebėkitę (ir užrašykite lentelėje) atitinkamas bazės ir kolektoriaus srovės reikšmes I_b ir I_k. Išmatuokite, kai kolektoriaus įtampa yra 4—5 V. Apskaičiuokite stiprinimo koeficientą

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}.$$

3. Raskite I_b priklausomybę nuo U_b (tranzistoriaus įėjimo charakteristiką). Nustatykite kolektoriaus įtampą $U_k=0$ ir, potenciometru R_1 keisdami įėjimo įtampą U_b nuo 0 iki 300 V, užrašykite keletą mikroampermetro parodymų (I_b).

Pakartokite bandymą, kai kolektoriaus įtampa 5 V.

4. Raskite I_k priklausomybę nuo U_k (tranzistoriaus išėjimo voltamperinę charakteristiką).

Kintamąja varža R_1 nustatykite bazės srovę 50 μA ir tik po to įjunkite raktą (srovė ima tekėti į kolektorių). Palaikydami nuolatinę bazės srovę, reostato R_2 kontaktu palaipsniui didinkite kolektoriaus įtampos reikšmę, iš pradžių iki 0,5 V, o kai kolektoriaus srovė beveik nebekis, padidinkite įtampą iki 1 V ir kiekvieną kartą lentelėje užrašykite voltmetro ir miliampermetro parodymus.

Pakartokite bandymą, esant kitai bazės srovei (pavyzdžiui, $I_b=100 \mu A$).

5. Pagal gautus rezultatus milimetriniame popieriuje nubrėžkite I_b (U_b), I_k (U_k) priklausomybių grafikus, raskite ΔI_b, ΔI_k ir ΔU_k išeities reikšmes ir nustatykite pagrindinius tranzistoriaus parametrus (stiprinimo koeficientą, įėjimo ir išėjimo varžas). Juos apskaičiuokite pagal formules, pateiktas darbo pradžioje ir nurodytas VII skyriuje.

Palyginkite stiprinimo koeficientus (β), gautus antroje ir penktoje užduotyje.

6. Nustatykite β, $r_{įėj.}$, $r_{išėj.}$ skaičiavimo paklaidas.

Po to pateikite parametrų (β, $r_{įėj.}$, $r_{išėj.}$) skaičiavimus ir pridėkite gautus grafikus.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kaip įrengtas tranzistorius?
2. Kodėl tranzistoriaus negalima laikyti paprasta dviejų paprastų puslaidininkinių diodų sankaupa?
3. Kokias išvadas galima padaryti, nagrinėjant gautus triodų voltamperinių charakteristikų grafikus?
4. Kaip keičiasi srovės stiprinimo koeficientas priklausomai nuo kolektoriaus srovės stiprumo ir kolektoriaus įtampos?

60. 3 DARBAS. TERMORELĖS SU TERMISTORIUMI SURINKIMAS IR BANDYMAS

Darbe susipažinsite, kaip veikia termorelė, signalizuojanti apie aplinkos temperatūros padidėjimą, ir laiko relė su tiesioginio kaitinimo termovarža.

Priemonės. Termovarža MMT-4, poliarizuota relė РП-5, 4 V nuolatinės srovės šaltinis (2 vnt.), 300—500 Ω reostatas, 60—100 W elektros lempa, 3,5 V elektros lemputė, kirtiklis, laidai, iki 60 V nuolatinės arba kintamos įtampos šaltinis, sekundometras.

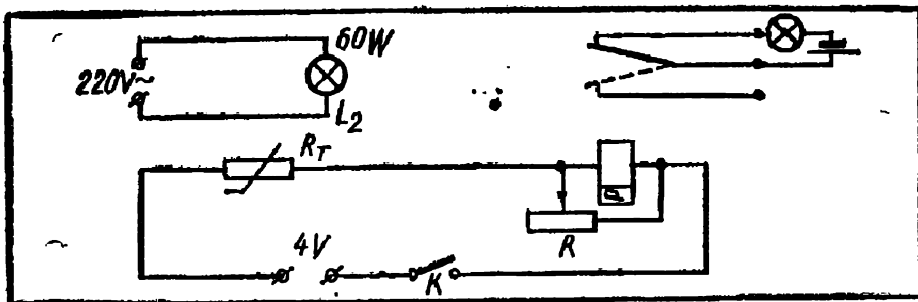
Darbo eiga

1. Surinkite schemą pagal 125 paveikslą ir ją parodykite dėstytojui. Įjungus pirminę grandinę, pradinės srovės paveikta relė gali pradėti veikti net tuo atveju, kai termovarža yra kambario temperatūroje. (Kad išvengtume šio reiškinio, lygiagrečiai rītei reikia įjungti 300Ω varžos reostatą R.)

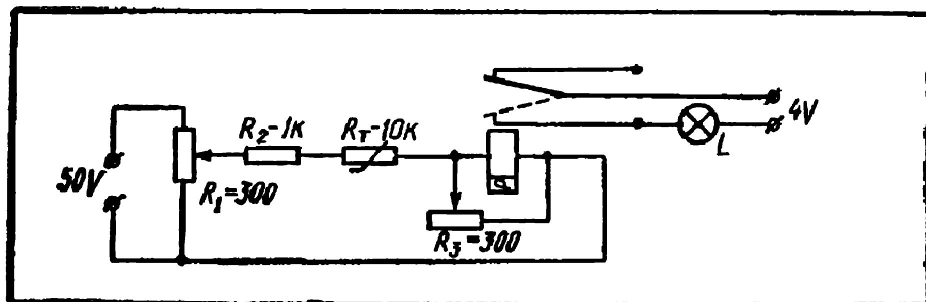
2. Įjunkite grandinę ir reostato R judamą kontaktą nustatykite tokioje padėtyje, kurioje relės vykdymo grandinė būtų išjungta.

Prineškite lempą L_2 prie termovaržos (125 pav.). Termovaržai įkaitus, relė pradės veikti ir įjungs lempą L_1, t. y. duos signalą, kad padidėjo aplinkos temperatūra. Pašalinkite lempą L_2; kai termovarža atšąla, lempa užgęsta.

3. Įrodykite, kad temperatūrą, kurioje relė pradeda veikti, galima reguliuoti reostatu R.



125 pav.



126 pav.

4. Surinkite laiko relės su tiesioginio kaitinimo termovarža schemą (126 pav.) ir parodykite dėstytojui. (Termistorių R_T ir papildomą varžą $R_2=1$ kΩ įjunkite nuosekliai su poliarizuotos relės apvija. Reostatas $R=300\Omega$, kaip ir pirmojoje užduotyje, yra mažinanti relės jautrumą priešvaržė.)

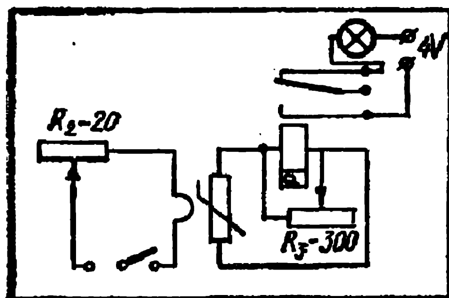
Įjungdami kirtiklį, paduokite į potenciometrą 50 V įtampą ir įjunkite kontrolinį sekundometrą. Pažymėkite lempos į vykdymo grandinę įjungimo laiką.

5. Išjunkite srovę, leiskite termistoriui atvėsti. Pakartokite bandymą, potenciometru pakeitę įtampą.

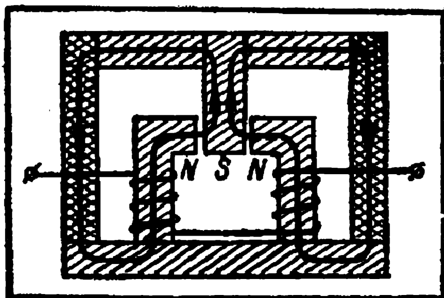
Padarykite išvadą, kaip, keičiant maitinimo įtampą, keičiasi laiko relės išlaikymo laikas.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kokiais principais pagrįstas termovaržų pritaikymas technikoje?
2. Paaiškinkite termorelės su termovarža veikimo principą.
3. Pasiūlykite relės su termistoriumi, galinčios palaikyti objekto pastovią temperatūrą, schemos variantą.
4. Paaiškinkite laiko relės su netiesioginio kaitinimo termovarža schemos darbą (127 pav.).



127 pav.



128 pav.

3 darbo priedas
Poliarizuotos relės įrengimas ir veikimas

Poliarizuota relė skiriasi nuo įprastų neutralių elektromagnetinių relių dideliu jautrumu. Pagrindinė poliarizuotos relės įrengimo savybė yra ta, kad elektromagnetas ir nuolatinis magnetas veikia kartu. Dviejų linijinių magnetų sukurti magnetiniai srautai dviem šakom praeina pro elektromagneto šerdį, o relės inkaras yra bendras jų magnetolaidis (128 pav.). Neutralėje esąs relės inkaras yra nepastovioje pusiausvyroje. Šiek tiek pastūmėtas inkaras nutolsta nuo neutralės ir yra pritraukiamas vieno iš polinių antgalių. Pastovi inkaro padėtis palaikoma spyruokle. Įjungiant srovę, elektromagnetas sustiprina nuolatinių magnetų srautą vienoje magneto šerdies pusėje ir susilpnina jį kitoje pusėje.

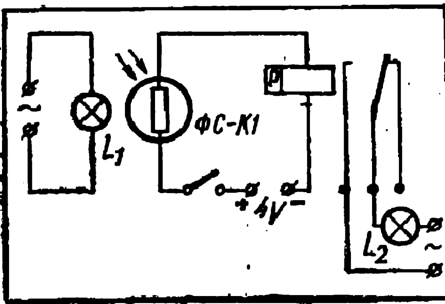
Relės kontaktus galima apkrauti ne didesne kaip 0,5 A srove!

61. 4 DARBAS. FOTOREZISTORINĖS RELĖS SURINKIMAS IR BANDYMAS

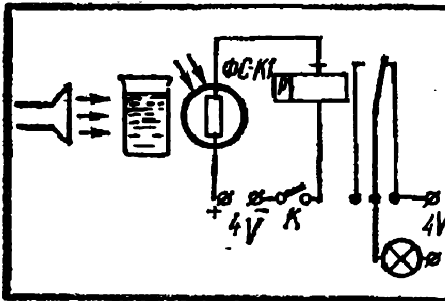
Darbe jūs susipažinsite, kaip veikia relė, signalizuojanti apie objekto apšviestumo pakitimą.

Puslaidininkinės fotovaržos yra paprastos konstrukcijos, mažų gabaritų, labai jautrios, mažai inertiškos ir neturi mechaninio ryšio su vykdymo grandine. Dėl to jos plačiai pritaikomos gamybos procesų automatizacijos kontrolei (apskaitai, gatavų gaminių rūšiavimui pagal matmenis ir spalvas ir t. t.), saugumui pramonėje ir transporte užtikrinti, automatinėje signalizacijoje ir t. t. Visuose įrengimuose pagrindinė dalis yra fotorelė. Fotorelę sudaro fotorezistorius, maitinimo šaltinis, elektromagnetinė relė, į kurios vykdymo grandinę įjungiama signalinė lempa, elektrinis skambutis, mikroelektrinis variklis arba kiti prietaisai.

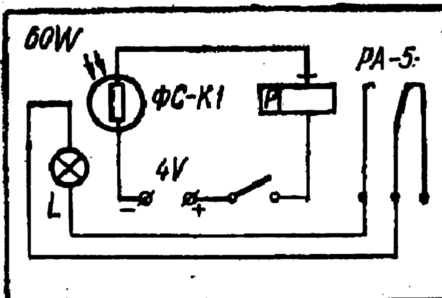
Priemonės. Fotovarža (fotorezistorius) ФС-К1 tipo, poliarizuota relė РП-5, 4 V maitinimo šaltinis (2 vnt.), 60 W ir 3,5 V elektros lempos, kišeninis elektrinis žibintas, cheminė stiklinė, smėlis, degtukai, pipetė.



129 pav.



130 pav.



131 pav.

Darbo eiga

1. Susipažinimas su fotorelės darbu. Pagal 129 paveikslą surinkite schemą. Į 4 V srovės šaltinio grandinę nuosekliai įjunkite fotovaržą, poliarizuotą relę ir kirtiklį. Relės kontaktus sureguliuokite taip, kad į vykdymo grandinę įjungta lempa L_2 užsidegtų, apšvietus fotorezistorių, o jį užtemdžius,— užgestų.

Lempą L_1 atitraukite nuo fotovaržos tiek, kad nedegtų lempa L_2. Po to ją lėtai artinkite prie fotovaržos, kol paveiks fotorelė.

Pakartokite šį bandymą, vietoj lempos L_1 panaudodami kišeninį žibintą.

2. Fotorelės pritaikymo nagrinėjimas. 1) *Fotorelės panaudojimas automatinėje priešgaisrinėje signalizacijoje.*

Prie fotovaržos uždėkite degtuką. Fotorelė reaguos į blykstelėjimą ir įjungs signalinę lempą.

2) *Skysčio arba birių kūnų lygio signalizatoriaus veikimo principas.* Pagal 130 paveikslą surinkite įrengimą. Fotorelės kontaktus sureguliuokite taip, kad, užtemdžius fotorezistorių, užsidegtų vykdymo grandinėje įjungta lempa. Pamažu į stiklinę pilkite smėlį. Kai smėlis pasieks nustatytą lygį, fotorelė įjungs signalinę lempą. Tą patį bandymą pakartokite su nudažytu skysčiu.

3) *Vandens skaidrumo automatinis kontroliavimas.*

Į stiklinę (įrengimas parodytas 130 paveiksle), įpilkite gryno vandens. Žibintą laikykite kuo toliau, kad dar galėtų

paveikti relė. Pipete į stiklinę įlašinkite rašalo arba kokio kito tamsaus skysčio. Kai vanduo stiklinėje susidrums, relė paveiks ir uždegs signalinę lempą.

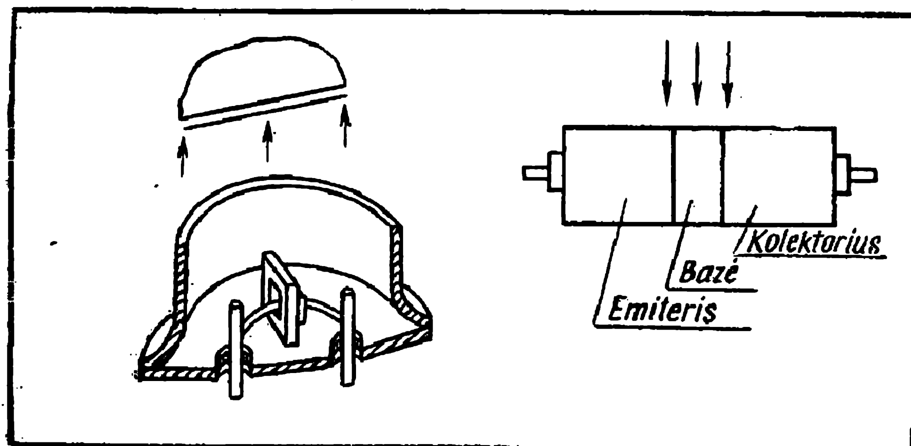
KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kur liaudies ūkyje naudojamos fotorelės?
2. Paaiškinkite elektrinio plūduro veikimo principą (131 pav.).
3. Pasiūlykite schemą prietaiso, kuriuo būtų galima skaičiuoti ir rūšiuoti gaminius.

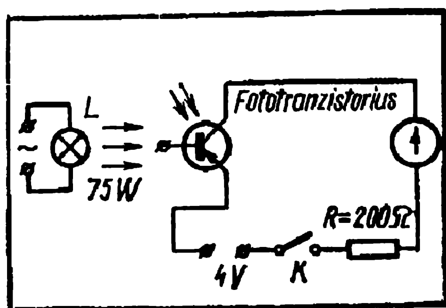
62. 5 DARBAS. FOTOTRANZISTORINĖS FOTORELĖS IR FOTORELĖS, TURINČIOS PUSLAIDININKINIUS FOTOELEMENTUS, SURINKIMAS IR BANDYMAS

Fototranzistorius yra plokštinis puslaidininkinis triodas, kurio bazės sritį galima apšviesti per stiklinį izoliatorių. Mokykloje fototranzistorius gaminamas iš paprasto plokštinio П-14, П-15 tipo triodo taip: kruopščiai (kad metalinės drožlės nepatektų į tranzistoriaus vidų) dilde pagal šoninę briauną nudildomas tranzistoriaus dangtelis ir pakeičiamas skaidria plastmasine plokštele, sauganačia fototranzistorių nuo drėgmės ir dulkių (132 pav.).

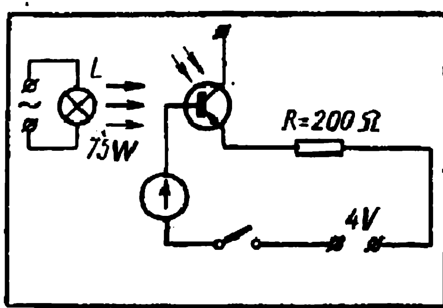
Veikiant šviesai, triodo bazėje atsiranda papildomų srovės nešėjų, kurie ne tik patys veikia kolektorinį perėjimą, bet ir sukelia didelio kiekio krūvių papildomą judėjimą iš emiterio srities. Kiekvienai bazės srityje šviesos sužadintai krūvių porai tenka tiek kartų daugiau krūvių, pereinančių iš emiterio į bazę, koks yra schemos su bendru emiteriu triodo srovės stiprinimo koeficientas.



132 pav.



133 pav.



134 pav.

Visi šie krūviai laisvai pereina kolektorinį perėjimą ir sukuria grandinėje srovę.

Iš bandymo matome, kad fototranzistoriaus jautrumas gana didelis: jis dešimtis kartų didesnis, negu paprasto fotodiodo.

Darbe reikia susipažinti, kaip sudaryta ir kaip veikia fototranzistorinė fotorelė, ir jos veikimą palyginti su fotorelės, turinčios puslaidininkinį fotoelementą.

Priemonės. Fototranzistorius, poliarizuota relė РП-5, galvanometras (ampermetro), 200 Ω varža, 60—100 W ir 3,5 V elektros lempos, 4 V srovės šaltinis (2 vnt.), kirtiklis, laidai.

Darbo eiga

1. Fototranzistoriaus veikimo nagrinėjimas.

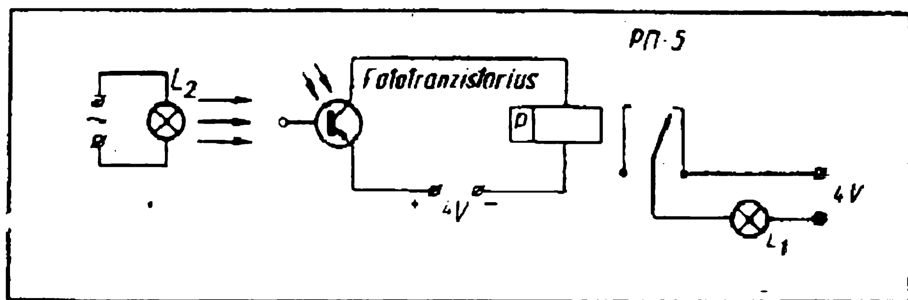
Pagal 133 paveikslą surinkite schemą. Fototranzistoriaus emiterį sujunkite su srovės šaltinio teigiamu poliumi, o kolektorių — per apkrovimo varžą su neigiamu poliu. Bazės išvadą palikite laisvą. Taip sujungus į triodo emiterio perėjimą teka tiesioginė srovė, o į kolektoriaus — atbulinė.

Pastatykite lempą per 10—15 cm nuo fototranzistoriaus ir įjunkite kirtiklį. Įsidėmėkite, per kiek padalų atsilenks galvanometro rodyklė.

Surinkite fotodiodo schemą (134 pav.). Lempą padėkite tokiu pačiu atstumu, kaip ir pirmajame bandyme, ir įjunkite kirtiklį. Įsidėmėkite, per kiek padalų atsilenks galvanometro rodyklė šį kartą. Kuriuo atveju — fototranzistoriaus schemoje ar fotodiodo schemoje — rodyklė atsilenks daugiau?

2. Fototranzistorinės fotorelės veikimo tyrimas.

Pagal 135 paveikslą surinkite schemą ir ją išbandykite. Tai priartindami, tai nutolindami nuo fototranzistoriaus lempą L_2, nustatykite tokį nuotolį, per kurį ims veikti relė.



135 pav.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Paaiškinkite fototranzistoriaus veikimo principą.
2. Kodėl fototranzistorius jautresnis už fotodiodą?
3. Pasiūlykite automatinio jungiklio su fototranzistoriumi įrengimo schemą.

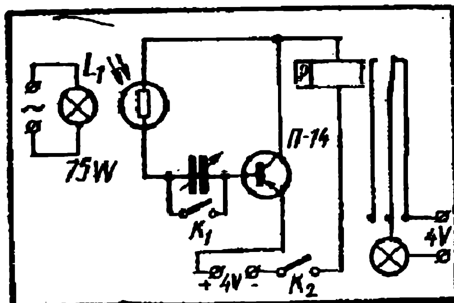
63. 6 DARBAS. LAIKO RELĖS SURINKIMAS IR BANDYMAS

Automatizuojant įvairius procesus, dažnai reikia panaudoti įvairios trukmės išlaikymą. Tai įmanoma atlikti laiko relėmis. Laiko relės funkcija yra ta, kad signalas į išėjimą paduodamas ne tuoj, patekus signalui į įėjimą, o po tam tikro laiko, vadinamo išlaikymo laiku.

Panagrinėsime laiko relės veikimo principą konkrečiu schemos pavyzdžiu. Schemoje (136 pav.), įjungus kirtiklį K_2, fotovarža, kuri yra tarsi daugelio omų kintamoji varža, teka srovė, įkraunanti kondensatorių. Srovė teka pro emiterinį triodo perėjimą. Ją sustiprina triodas, ir relė ima veikti. Lempa, įjungta į vykdymo grandinę, užsidega. Kai kondensatorius įsikrauna visiškai, emiterinio perėjimo srovė sumažėja, taigi sumažėja ir srovė kolektoriaus grandinėje. Po tam tikro laiko kolektoriaus srovė sumažėja tiek, kad relė išjungia lempą. Vadinasi, lempa dega tik tol, kol kondensatorių baterija visiškai įsikrauna. Tuo ir nustatomas išlaikymo laikas.

Kad pasikartotų bandymas, reikia iškrauti kondensatorių, įjungus kirtiklį K_1.

Priemonės: puslaidininkinis triodas, fotovarža ФС-К1, poliarizuota relė РП-5, kondensatorių baterija C-58 μF, 30 Ω reostatas, du 4 V srovės šaltiniai, du kirtikliai, 60 W lempa, 3,5 V lempa, laidai, sekundometras.



136 pav.

Darbo eiga

1. Pagal 136 paveikslą surinkite schemą ir parodykite ją dėstytojui.

2. Išnagrinėkite laiko relės paveikimo laiko priklausomybę nuo kondensatoriaus talpos.

Pastatykite lempą L_1 per 80—100 cm nuo fotovaržos. Kai kondensatoriaus talpa 2μF, įjunkite grandinę (kirtiklį K_2), sekundometru nustatykite, kiek laiko šviečia lempa (kol ji visiškai užgęsta). Išjunkite kirtiklį K_2. Įjungdami ir išjungdami kirtiklį K_1, iškraukite kondensatorių bateriją. Pakartokite tokį pat bandymą, kai talpa 4, 8, 16, 32, 58 μF. Padarykite išvadą, kaip keičiasi relės išlaikymo laikas, keičiant talpumą.

3. Ištirkite, kaip relės paveikimo laikas priklauso nuo fotovaržos apšviestumo.

Artindami kas 20—25 cm lempą prie fotovaržos, išmatuokite relės išlaikymo laiką. Padarykite išvadas, kaip keičiasi relės išlaikymo laikas priklausomai nuo nuotolio tarp lempos ir fotovaržos, t. y. nuo varžos pakitimo.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Paaiškinkite, kodėl, didinant fotovaržos apšviestumą, mažėja laiko relės išlaikymo laikas.

2. Kaip laiko relės išlaikymo laikas priklauso nuo kondensatorių baterijos talpos ir kodėl?

64. 7 DARBAS. FEROMAGNETINĖS ŠERDIES ĮMAGNETINIMO KREIVIŲ (HISTEREZĖS KILPŲ) STEBĖJIMAS

Feromagnetiko magnetinę būseną apibūdina įmagnetinimas. Įmagnetinimas $I=B-B_0=(\mu-1)B_0$. I priklausomybė nuo B_0 sudėtinga, nes feromagnetikų μ priklauso nuo B_0; be to, dydžiui μ (taigi ir dydžiui B ir I) įtaką turi ir buvęs ankstesnis feromagnetiko įmagnetinimas.

I priklausomybė nuo B_0 (B nuo B_0) vadinama įmagnetinimo kreive. Ji yra histerezės kilpos pavidalo (111 pav.). Įmagnetinimo kreivėje atkarpa OA — pagrindinė kūno įmagnetinimo, priklausančio nuo išorinio magnetinio lauko, kreivė.

Jeigu, pasiekę tašką A, pradėsime silpninti įmagnetinantį (išorinį) lauką B_0, tai indukcija B mažės pagal kreivę AD, t. y. šiek tiek atsiliks. Šis atsilikimas vadinamas *histereze*.

Indukcijos B_1 dydis, lygus OD, vadinamas liekamąja indukcija, t. y. feromagnetikas lieka įmagnetintas, nežiūrint to, kad išorinis laukas $B_0=0$.

Feromagnetikas visiškai išsimagnetins, sudarius B_0 indukcijos priešingos krypties lauką (atkarpa OK), t. y. solenoido apvi-

jomis praleidus priešingos krypties srovę. Šio lauko dydis vadinamas *sulaikomąja*, arba *koercityvine, jėga*. Toliau didinant priešinga kryptimi lauką B_0, šerdyje sukeliama priešingos krypties indukcija; tuo atveju B didės kreive KA'.

Po to, mažinant B_0 iki nulio, gaunama B_1 indukcija, lygi OD' — ji vadinama *neigiama liekamąja indukcija*.

Vėl pakeisdami srovės, taigi ir išorinio lauko, kryptį, gauname dydį $B_0 = OK'$. Ši B_0 reikšmė nustato koercityvinės jėgos, reikalingos priešingos krypties liekamajai indukcijai OD' panaikinti, dydį. Toliau stiprinant lauką, kreivė nuo taško K' eis aukštyn ir užsidarys taške A.

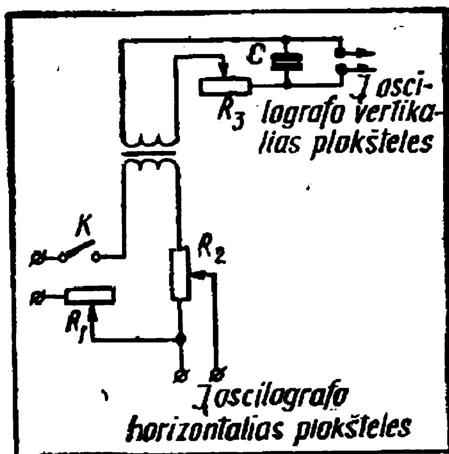
Kad gautume histerezės kilpą, darbe panaudojamas atlenkiančių elektrinių laukų metodas. Histerezės kilpą galima stebėti oscilografo ekrane.

Priemonės. Mokyklinis oscilografas, Рнш, 3 kΩ reostatas, du reostatai po 30 Ω, universalus transformatorius, 58 μF kondensatorių baterija, raktas, laidai.

Įrengimo aprašymas

Transformatorius, kurio apvijų santykis 1 : 1 (1 : 2), įjungiamas į tinklą (137 pav.). Į pirminę transformatoriaus grandinę įjungti du reostatai R_1 ir R_2. Reostato R_1 paskirtis yra keisti pirminėje transformatoriaus grandinėje srovės stiprumą, kol geležinė transformatoriaus šerdis įsimagnetins iki prisotinimo. Reostato R_2 galuose atsiranda kintama EVJ, proporcinga pirminės transformatoriaus ritės srovės sukeltai magnetinei indukcijai B_0. Ši EVJ tiekiama į horizontalias oscilografo plokšteles.

Antrinė transformatoriaus apvija sujungiama kondensatoriumi ir reostatu. Kondensatoriuje C atsiradusi kintama įtampa tiekiama į vertikalias oscilografo plokšteles. Jei kondensatoriaus reaktyvinė varža daug didesnė už varžą R_3, tai kondensatoriuje kintama įtampa proporcinga transformatoriaus šerdyje indukcijos B pakitimui. Dėl to, dviem tarpusavyje statmeniems elektriniams laukams veikiant elektronų pluoštą, šviesi dėmė ekrane apibrėš figūrą, panašią į histerezės kilpą.



137 pav.

Darbo eiga

1. Pagal 137 paveikslą surinkite schemą (120 V transformatoriaus rites. $R_1=R_2=30\Omega$, $R_3=3k\Omega$). Į transformatoriaus įėjimą tiekite 30—40 V įtampą iš autotransformatoriaus. Schemą parodykite dėstytojui.

2. Įjunkite oscilografą. Kai jis įkais, nustatykite, kad šviečiantis taškas būtų ekrano centre. Rankeną „dažnumų diapazonas" nustatykite padėtyje „išjungta", jungiklį „daliklis" į padėtį „220 V". Įjunkite raktą *K*. Keisdami varžas R_1, R_2, R_3 ir talpą, taip pat rankenėlėmis „stiprinimas" reguliuodami vaizdą pagal *x* ir *y*, oscilografo ekrane gausite histerezės kilpos vaizdą. Per kalkę nubrėžkite histerezės kilpos oscilogramą.

KONTROLINIAI KLAUSIMAI

1. Kaip paaiškinti geležies laipsniško įmagnetinimo procesą, pereinantį į „prisotinimą"?
2. Kuo paaiškinamas liekamasis magnetizmas?
3. Kaip visiškai išmagnetinti šerdį?
4. Kas tai yra magnetinė histerezė?
5. Ką apibūdina histerezės kilpos plotas?

I. Kietųjų kūnų linijinio plėtimosi koeficientai (deg^{-1})

Aliuminis	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$	Plienas	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$
Alavas	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$	Švinas	$2{,}9 \cdot 10^{-5}$
Ketus	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	Varis	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$

II. Tamprumo moduliai

Medžiaga	Jungo modulis E (10^{11} N/m^2)	Šlyties modulis G (10^{11} N/m^2)
Aliuminis	0,70	0,27
Ketus	1,1	0,46
Plienas	2,0	0,80
Švinas	0,16	0,06
Varis	1,1	0,42

III. Teorinis ir eksperimentinis medžiagų atsparumas

Medžiaga	Teorinis atsparumas (10^7 N/m^2)	Eksperimentinis atsparumas (10^7 N/m^2)
Aliuminis (identiškas polikristalas)	600	9,2
Cinkas (valcuotas)	840	13
Geležis (identiškas polikristalas)	2100	29
Geležis (dendritai)	2100	iki 1000
Plienas (termomechaniškai apdorotas)	2100	250
Valgomoji druska (monokristalas)	250	0,5
Varis (identiškas polikristalas)	1200	23
Varis (dendritai)	1200	340

IV. Diamagnetinių ir paramagnetinių medžiagų magnetinis skvarbumas

Diamagnetinės medžiagos	Magnetinis skvarbumas	Paramagnetinės medžiagos	Magnetinis skvarbumas
Auksas	0,999963	Aliuminis	1,000023
Bismutas	0,999824	Azotas	1,000013
Cinkas	0,999991	Deguonis	1,000017
Sidabras	0,999981	Deguonis (skystas)	1,0034
Stiklas	0,999987	Ebonitas	1,000014
Vandenilis	0,999937	Oras	1,000038
Vanduo	0,999991	Platina	1,000253
Varis	0,99912	Volframas	1,000175

V. Nuolatinių magnetų gamybai naudojami lydiniai

Volframinis plienas (94% Fe, 6% W)
Chrominis plienas (97% Fe, 3% Cr)
Kobaltinis plienas (90% Fe, 5% Co, 5% Cr)
Alnijus (56% Fe, 25% Ni, 14% Al, 5% Cu)
Alnisis (51% Fe, 34% Ni, 14% Al, 1% Si)
Alnikas (55% Fe, 17% Ni, 10% Al, 12% Si, 6% Cu)
Magnikas (52% Fe, 24% Co, 13% Ni, 8% Al, 3% Cu).

VI. Magnetiniai lydiniai

Alsiferis (85% Fe, 9,6% Si, 5,4% Al)
Permalojus 45 (54% Fe, 45% Ni, kitos priemaišos)
Permalojus 78 (21% Fe, 78% Ni, kitos priemaišos)
Permendiuras (49% Fe, 49% Co, 2% V)
Supermalojus (15% Fe, 79% Ni, 5% Mo)
Transformatorinis plienas (95,9% Fe, 4% Si, 0,02% C, kitos priemaišos)

VII. Feromagnetinių medžiagų magnetinis skvarbumas

Metalas	Maksimalus magnetinis skvarbumas	Pritaikymo sritys
Alsiferis	117000	Prietaisų korpusai
Supermalojus	1000000	Transformatoriai
Permendiuras	4500	Elektromagnetų poliai
Silicinė geležis	10000	Elektros mašinos ir jėgos transformatoriai

VIII. Įvairių feromagnetikų Kiuri temperatūra

Geležis	780°C	Permalojus	78—550°C
Nikelis	360°C	Permalojus	30— 70°C
Kobaltas	1150°C		

Puslaidininkinių diodų žymėjimas

Diodo ženklas turi du elementus. Pirmasis elementas — raidė „Д" — taikoma visiems puslaidininkiniams diodams. Antrasis elementas — skaitmuo — rodo atitinkamą klasifikaciją (žr. 1 lentelę); silicio diodas skiriasi nuo germanio, plokštiniai diodai — nuo taškinių ir t. t.

Paskutinis skaičius rodo diodų tipų pagal vienos grupės elektrinių parametrų klasifikaciją.

Lygintuviniai diodai skirstomi tipais pagal atbulinės įtampos didžiausią amplitudę ir išlyginamos srovės dydį.

1 lentelė

Medžiaga	Taškiniai diodai	Plokštiniai diodai	Maišymo detektoriai	Dauginimo diodai
Germanis	1÷100	301÷400	401÷500	501÷600
Silicis	101÷200	201÷300	401÷500	501÷600
Medžiaga	**Videodetektoriai**	**Parametriniai diodai**	**Stabilitronai**	**Lygintuviniai stulpeliai**
Germanis	601÷700	701÷800	801÷900	1000 ir daugiau
Silicis	601÷700	701÷800	801÷900	1000 ir daugiau

Pastaba. Ankstesnės laidos diodai (Д7) klasifikuojami kitaip. Jie visi skirti radijo ir elektrotechninei aparatūrai, pramoninio dažnumo kintamos srovės išlyginimui ir skiriasi vienas nuo kito atbulinės įtampos didžiausia amplitude (žr. 2 lentelę).

2 lentelė

Diodo tipas	Д7А	Д7Б	Д7В	Д7Г	Д7Д	Д7Е	Д7Ж
Atbulinės įtampos didžiausia amplitudė (V)	50	100	100	200	200	300	400

Pavyzdys. Д206, Д207 — plokštiniai silicio diodai; jie skiriasi atbulinės įtampos didžiausia amplitude. Д302, Д305 — plokštiniai germanio diodai; jie skiriasi atbulinės įtampos didžiausia amplitude ir išlyginta srove.

Puslaidininkinių triodų žymėjimas

Triodų ženklas turi tris elementus. Pirmasis elementas — raidė „П" — taikoma visiems triodams ir skiria puslaidininkinius triodus nuo diodų, Holo daviklių, fotoelementų ir t. t. Antrasis elementas — skaitmuo — rodo apdirbimo eilės numerį, jis skiria tranzistorius pagal dažnumą, galingumą ir klasifikacinius parametrus. Šis skaitmuo parodytas 3 lentelėje. Trečiasis elementas — raidė — skiriamas tranzistoriams, kurie turi vienodus klasifikacinius parametrus, tačiau skiriasi kitais parametrais.

Pavyzdys. П6Б, П9, П13А — žemo dažnumo, mažo galingumo, vienodų klasifikacinių parametrų germanio tranzistoriai ($f_{\alpha}=465$ kHz) turi skirtingus žymėjimus, nes jie įsisavinti skirtingu laiku ir pagal skirtingą technologiją. П13, П14 — germanio tranzistoriai, įsisavinti tuo pačiu metu, abu žemo dažnumo ir mažo galingumo, tačiau skiriasi klasifikaciniu parametru f_{α} (atitinkamai 0,465 MHz ir 1 MHz). Tranzistoriai П13 ir П13А skiriasi tik stiprinimo koeficientu α (atitinkamai 0,92 ir 0,97).

3 lentelė

Dažnio riba		Žemo dažnio ($f<5$ MHz)		Aukšto dažnio ($f\geqslant5$ MHz)	
Tranzistoriaus sklaidos galingumas		Mažasis $P<0{,}25$ W	Didysis $P\geqslant0{,}25$ W	Mažasis $P<0{,}25$ W	Didysis $P\geqslant0{,}25$ W
Klasifikacinis parametras		Dažnis f_{α} ir f_{β}	Įtampa U_{kB}, U_{ke} ir koeficientas β	Dažnis f_{α} ir f_{β}	Dažnis f_{p}
Tranzistoriaus Nr.	Germanio	1—100	201—300	401—500	601—700
	Silicio	101—200	301—400	501—600	701—800

UŽDAVINIŲ SPRENDIMAS IR ATSAKYMAI

2-1. a) Kiekvienas gardelės mazgas A (žr. 59 pav.) priklauso 8 narveliams, t. y. jo indėlis į vieną narvelį yra $^1/_8$. Narvelyje tokių mazgų aštuoni, todėl vienam narveliui tenka $\frac{1}{8}\cdot 8=1$.

Atsakymas: 1 dalelė.

b) Plokštumoje centruotoje kubinėje gardelėje, be mazgų A (jų indėlis į narvelį yra 1, žr. aukščiau), kiekvienos sienos vidurys turi mazgą. Tokių mazgų narvelyje šeši (toks sienų skaičius). Kiekvienas jų priklauso dviem kaimyniniams narveliams, taigi vienam narveliui tenka $^1/_2$. Visų šešių mazgų indėlis į vieną narvelį yra $\frac{1}{2}\cdot 6=3$.

PCK struktūros vienam narveliui tenka $1+3=4$.

Atsakymas: 4 dalelės.

2-2. Vario struktūra PCK. Tankis 8,9 g/cm^3. Vienas narvelis turi 4 atomus (žr. užd. 2-1). Narvelio tūris a^3; čia a — kubo briauna. Taigi vienai dalelei tenka $a^3/4$ narvelio tūrio dalis.

Vario molinė masė $M=64\cdot 10^{-3}$ kg/mol. Vario tankis

$$\rho=\frac{M}{N_A\cdot\frac{a^3}{4}};\ \text{iš čia}\ a=\sqrt[3]{\frac{4M}{\rho N_A}},\ \text{arba}$$

$$a=\sqrt[3]{\frac{4\cdot 64\cdot 10^{-3}\ \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{8{,}9\cdot 10^{3}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\cdot 6{,}02\cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}}}\approx 3{,}6\cdot 10^{-10}\ \text{m}.$$

Esant PCK struktūrai, besiliečiantys atomai yra sienų viduryje ir viršūnėje; todėl jų spindulių suma $2r=d=\frac{a\sqrt{2}}{2}$. Iš čia $d=\frac{3{,}6\cdot 10^{-10}\ \text{m}\ \sqrt{2}}{2}\approx$ $\approx 2{,}5\cdot 10^{-10}$ m.

Atsakymas: $a\approx 3{,}6\cdot 10^{-10}$ m, $d\approx 2{,}5\cdot 10^{-10}$ m.

2-3. Atsakymas: 1 cm^3 aukso atomų skaičius $n=5{,}8\cdot 10^{22}$ cm^{-3}, $a=4{,}0\cdot 10^{-10}$ m, $d=2{,}8\cdot 10^{-10}$ m.

2-4.

Gardelės charakteristika	Gardelės tipas		
	paprasta	ECK	PCK
Gardelės tūris	a^3	a^3	a^3
1 gardelei tenkantis dalelių skaičius	1	2	4
Nuotolis tarp artimiausių dalelių	a	$a\frac{\sqrt{3}}{2}$	$a\frac{\sqrt{2}}{2}$
Kaimynų skaičius	6	8	12

2-5. Polimorfizmas: pakankamai žemoje temperatūroje persitvarko kristalinės gardelės (baltasis alavas — pilkasis alavas).

2-6. Kai ECK $\rho_1 = \frac{M}{N_A \cdot \frac{a_1^3}{2}}$ (žr. 2 užd. p. 63). PCK atveju $\rho_2 = \frac{M}{N_A \cdot \frac{a_2^3}{4}}$

(žr. 2-2 uždavinį); iš čia $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{2a_1^3}{a_2^3}$, arba $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{2(2{,}86 \cdot 10^{-10}\,\text{m})^3}{(3{,}56 \cdot 10^{-10}\,\text{m})^3} \approx 1{,}04$.

Atsakymas: tankis padidėja 4%.

2-7. Atsakymas: paprastoje, erdvėje centruotoje ir plokštumoje centruotoje struktūroje atomai atitinkamai užima 52, 68 ir 74% viso narvelio tūrio. Taigi paprastoji struktūra — pats nepatogiausias glaudaus supakavimo būdas.

3-1. Metalų linijinio plėtimosi koeficiento vidutinė reikšmė $\alpha = 10^{-5} \div 10^{-6}$ deg^{-1}; santykinė deformacija $\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$. Kai $\Delta T = 1$ deg $\frac{\Delta l}{l} = \alpha$, t. y. įkaitinus 1 deg, visi atomo centrai vienas nuo kito nutolsta vidutiniškai $10^{-5} - 10^{-6}$ pradinio nuotolio, t. y. savo skersmens.

3-2. $\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$; esant tampriajai deformacijai $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$ (Huko dėsnis); iš čia $\alpha \Delta T = \frac{\sigma}{E}$ ir $\sigma = E\alpha\Delta T$. Aliuminio $\alpha = 26 \cdot 10^{-6}$ deg^{-1}, $E = 69 \cdot 10^9$ N/m^2, t. y. $\sigma = 69 \cdot 10^9$ N/m$^2 \cdot 26 \cdot 10^{-6}$ deg$^{-1} \cdot 1° = 18 \cdot 10^5$ N/m^2.

Atsakymas: $18 \cdot 10^5$ N/m^2.

3-3. Atsakymas: $12 \cdot 10^7$ N/m^2.

3-4. Atsakymas: $2{,}1 \cdot 10^3$ J/(kg·deg).

3-5. Netaikomas.

3-6. Specifinis šiluminis talpumas $c = \frac{Q}{m\Delta T}$. Tuo pačiu metu $c = \frac{C_\mu}{M}$; čia C_μ — molekulinis šiluminis talpumas, M — medžiagos molinė masė. Todėl $\frac{Q}{m\Delta T} = \frac{C_\mu}{M}$; iš čia $M = \frac{C_\mu m \Delta T}{Q}$. Kadangi $C_\mu = 25$ J/(mol·deg), tai $M =$

$$= \frac{25 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{deg}} \cdot 0{,}3\,\text{kg} \cdot 30°}{24\,900\,\text{J}} \approx 9 \cdot 10^{-3}\ \text{kg/mol}.$$

Atsakymas: santykinė atominė masė lygi 9; taigi metalas yra berilis.

3-8. Atsakymas: $4{,}75 \cdot 10^5$ J; 4 cm.

4-1. Atsakymas: katilų gamybai parenkamos plastiškesnės medžiagos (*b*), įrankiams — kietesnės ir mažiau besideformuojančios (*a*).

4-2. Atsakymas: a) neskaitant lyno svorio, įtampa $\sigma \approx 1{,}7 \cdot 10^8$ N/m^2, atsparumo atsarga $n = 9$; b) įskaitant lyno svorį $\sigma = 2 \cdot 10^8$ N/m^2, atsparumo atsarga $n = 7{,}5$.

4-3. Atsparumo riba $\sigma_{\text{rib}} = \frac{m_{\text{rib}} g}{S} = \frac{\rho l_{\text{rib}} S g}{S} = \rho l_{\text{rib}} g$; iš čia $l_{\text{rib}} = \frac{\sigma_{\text{rib}}}{\rho g}$. Panaudoję ankstesnio uždavinio duomenis, gauname

$$l_{\text{rib}} = \frac{15 \cdot 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{8 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 1{,}9 \cdot 10^4\ \text{m}.$$

Atsakymas: $l_{\text{rib}} = 1{,}9 \cdot 10^4$ m.

4-4. a — ketus (trapesnis).
b — aliuminis (klampesnis).

4-5. Dviejų skersinių pjūvių, kuriais išorinė jėga stengiasi „nupjauti" varžtą, plotas $S=2\,\frac{\pi d^2}{4}$. Tuo metu $\sigma=\frac{F}{S}$ ir $S=\frac{F}{\sigma}$, t. y. $2\,\frac{\pi d^2}{4}=\frac{F}{\sigma}$;

iš čia $d=\sqrt{\frac{2F}{\pi\sigma}}=2{,}5\cdot10^{-2}$ m.

Atsakymas: $2{,}5\cdot10^{-2}$ m.

4-6. Atsakymas: $\varphi_{\text{švino}}/\varphi_{\text{ketaus}}\approx8$; $\Delta x_{\text{šv}}/\Delta x_{\text{ket}}\approx8$.

4-7. Atsakymas: santykinė deformacija $\frac{\Delta h}{h}=3\cdot10^{-6}$; $\Delta h=6\cdot10^{-7}$ m.

4-9. Atsakymas: kambario temperatūroje specifinis vakansijų skaičius 10^{-13}; aliuminio skystėjimo temperatūroje (931°K) — 10^{-4}.

4-10. Atsakymas: 10^{-86}.

7-1. Pagal klasikinę elektronų teoriją metaluose srovės stiprumas $I=en\bar{v}S$; čia e — elektrono krūvis, n — elektronų koncentracija, S — laidininko skersinio pjūvio plotas, $\bar{v}$ — kryptingo elektronų judėjimo vidutinis greitis. Iš to $\bar{v}=\frac{I}{enS}=\frac{j}{en}$ (j — srovės tankis). Tuo metu elektrono judėjimo kinetinė energija $\frac{m_e v_{\text{šil.}}^2}{2}=\frac{3}{2}kT$; iš čia $v_{\text{šil.}}=\sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$.

Išsprendę gausime:

$$\bar{v}\approx6\cdot10^{-3}\ \text{m/s};$$
$$v_{\text{šil}}\approx1{,}2\cdot10^{5}\ \text{m/s}.$$

7-2. Lygių skaičių $N=\frac{n}{2}$ (Paulio principas).

$\Delta E=\frac{E_F}{N}=\frac{E_F}{\frac{n}{2}}$; $\Delta E=\frac{7\,\text{eV}\cdot2}{10^{29}}\approx14\cdot10^{-29}$ eV/lyg, t. y. lygiai beveik nenutrūkstamai eina vienas paskui kitą.

Atsakymas: $\Delta E=14\cdot10^{-29}$ eV/lygiui.

7-3. Atsakymas: zonos viduje elektronai pereiti gali, tarp zonų — negali.

7-4. Atsakymas: metalas, kurio išsilaisvinimo darbas mažesnis, turi didesnį potencialą $\Delta\varphi=0{,}5$ V.

7-5. Sakykime, kad pavyzdys — vientisinio dielektriko taisyklinga prizmė, kurios pagrindas S ir briauna L, lygiagreti išorinio elektrinio lauko stiprumo vektoriui $\vec{E}$. Poliarizacijos metu visas dielektriko pavyzdys įgyja dipolio momentą $\vec{P}=q\vec{L}=\sigma S\vec{L}$; čia σ — dėl poliarizacijos atsiradęs paviršinio krūvio tankis, S — (+) arba (−) įelektrinto pavyzdžio paviršiaus plotas. Antra, viso pavyzdžio dipolio momentą galima apskaičiuoti kaip $\vec{P}=\vec{P'}V$; čia V — dielektriko tūris, o $\vec{P'}$ — dielektriko tūrio vieneto elektrinis momentas,

t. y. $\left.\begin{aligned}\vec{P'}V&=\sigma SL\\ \vec{P'}V&=P'SL\end{aligned}\right\}\ \sigma SL=P'SL,$

t. y. $P'=\sigma$; tai ir reikėjo įrodyti.

7-6. Atsakymas: $32\cdot 10^{16}$ elektronų.

7-7. 1 cm³ germanio turi $\frac{N_A}{\frac{M}{\rho}}\cdot 10^{-6}=\frac{N_A\rho}{M}\cdot 10^{-6}$ atomų; čia M — molinė masė, lygi $73\cdot 10^{-3}$ kg/mol, ρ — germanio tankis, lygus $5{,}4\cdot 10^3$ kg/m³. Taigi 1 cm³ germanio yra priemaišų $10^{-11}\cdot\frac{N_A\rho}{M}\cdot 10^{-6}\approx 4\cdot 10^{11}$ atomų.

Atsakymas: $4\cdot 10^{11}$ atomų.

7-9. Germanio tūris $V=\frac{0{,}1\text{ kg}}{5{,}4\cdot 10^3\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}=\frac{10^{-4}}{5{,}4}\text{m}^3$. Stibio atomų skaičius

$\frac{10^{-9}\text{ kg}\cdot 6{,}02\cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}}{122\cdot 10^{-3}\frac{\text{kg}}{\text{mol}}}\approx\frac{10^{17}}{20}\approx 5\cdot 10^{15}$. Stibio valentingumas 5; vadinasi laisvaisiais krūvių nešėjais taps po vieną elektroną iš kiekvieno stibio atomo.

Elektronų koncentracija $n=\frac{0{,}5\cdot 10^{16}}{\frac{10^{-4}\text{ m}^3}{5{,}4}}\approx 27\cdot 10^{19}\text{ m}^{-3}$.

Atsakymas: $27\cdot 10^{19}$ m⁻³.

7-10. Ne, nes, krintant temperatūrai, dėl mažėjančios laisvųjų krūvių nešėjų koncentracijos padidėja germanio varža.

7-11. Negalima.

8-2. Geležies 1 m³ atomų skaičius $n=\frac{\rho}{M}N_A$;

$$n=\frac{7{,}8\cdot 10^3\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\cdot 6\cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}}{56\cdot 10^{-3}\frac{\text{kg}}{\text{mol}}}\approx 0{,}8\cdot 10^{29}\text{ m}^{-3};$$

čia ρ — tankis, N_A — Avogadro skaičius, M — geležies molinė masė.

Atomo vidutinis magnetinis momentas yra $\frac{1{,}84\cdot 10^6\frac{\text{A}}{\text{m}}}{6{,}8\cdot 10^{29}\text{ m}^{-3}}\approx 2\cdot 10^{-23}\text{ A}\cdot\text{m}^2$; jis apytikriai atitinka $\frac{2\cdot 10^{-23}\text{ A}\cdot\text{m}^2}{9\cdot 10^{-24}\text{ A}\cdot\text{m}^2}\approx 2$ kiekvieno atomo orientuotus sukinio magnetinius momentus.

3-4. Palyginus geležies, nikelio ir 30% permalojaus Kiuri temperatūras (atitinkamai 780, 360 ir 70°C), paaiškėja, kad tik iš permalojaus pagaminta plokštelė neteks savo magnetinių savybių ir negalės išlaikyti krūvio.

Svetlana Anofrikova, Marija Bobkova, Lidija Ivanova, Samuilas Kameneckis, Tamara Nosova, Natalija Puryševa, Natalija Parfentjeva, Michailas Terentjevas

FAKULTATYVINIS FIZIKOS KURSAS

Mokymo priemonė X klasei



Redaktorius *A. Degėsys*

Viršelis *L. Prialgauskaitės*. Men. redaktorė *A. Onaitytė*

Techn. redaktorė *R. Berteškaitė*. Korektorė *I. Grybinaitė*

Vertimą recenzavo *Balys Grigas*



Светлана Вениаминовна Анофрикова, Мария Абрамовна Бобкова, Лидия Александровна Иванова, Самуил Ефимович Каменецкий, Тамара Ивановна Носова, Наталия Сергеевна Пурышева, Наталия Ефимовна Парфентьева, Михаил Мокеевич Терентьев

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ

Учебное пособие для X класса

Оригинал под ред. *А. В. Перышкина, С. Е. Каменецкого*

Перевел с русского *Альгирдас Пятрайтис*

Рекомендовано Министерством просвещения Литовской ССР

На литовском языке

Литовская ССР, 233000, Каунас, пр. Ленина, 25, издательство «Швиеса»



IB Nr. 574

Duota rinkti 79.04.23. Pasirašyta spausdinti 79.10.19. Formatas 60×90$^{1}/_{16}$, popierius spaudos Nr. 3, literatūrinė garnitūra, iškilioji spauda, viena spalva. 10+0,25 (įklijos) sąl. sp. lnk., 11,76+0,32 (įkl.) leid. lnk. Tiražas 15 000 egz. Užsakymo Nr. 576. Leid. Nr. 8471.

Kaina 45 kap.

Leidykla „Šviesa", 233000 Kaunas, Lenino pr. 25.
V. Kapsuko-Mickevičiaus spaustuvė, 233000 Kaunas, Lenino pr. 23.